

УДК 536.46+544.452

**ДВИЖЕНИЕ ГОРЯЩИХ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛА В ПРОДУКТАХ ГОРЕНИЯ
КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

**MOVEMENT OF BURNING METAL PARTICLES IN COMBUSTION PRODUCTS
OF CONDENSED SYSTEMS**

А. Н. Лепяев, С. И. Ксенофонов, О. В. Васильева

A. N. Lepaev, S. I. Ksenofontov, O. V. Vasilyeva

*ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный педагогический
университет им. И. Я. Яковлева», г. Чебоксары*

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы диспергирования, образования и роста частиц в пламени конденсированных систем. Показано, что вокруг горящей материнской частицы образуется облако дочерних частиц, состоящее из продуктов горения. Рассчитана максимально возможная концентрация дочерних частиц при парофазном режиме горения. Движение горящих частиц металла в продуктах горения сильно отличается от движения инертной частицы.

Abstract. The paper considers the issues of dispersion, formation and growth of particles in the flame of condensed systems. It is shown that around burning parent particles there forms a cloud of daughter particles consisting of products of combustion. The authors have calculated the maximum concentration of daughter particles in vapor combustion mode. The movement of burning metal particles in combustion products differs from the movement of the inert particle.

Ключевые слова: *пламя, алюминий, дисперсная частица, концентрация, поглощение, диспергирование, агломерация.*

Keywords: *flame, aluminium, dispersed particle, concentration, absorption, dispersion, agglomeration.*

Актуальность исследуемой проблемы. Дисперсные частицы являются неотъемлемой составляющей почти любого пламени. Распределение дисперсных частиц по размерам и локализация их в продуктах горения являются важными вопросами.

Цель настоящей работы – экспериментальное определение границ облака дочерних частиц, образовавшегося вокруг горящей частицы металла, и сравнение экспериментальных данных с данными других исследований.

Материал и методика исследований. В работе изучалось движение частиц горящего металла методами фотографирования пламени и отбора проб дисперсных частиц на подложки. Поверхность пробоотборника впоследствии исследовалась под микроскопом. При обработке экспериментальных результатов применялись современные компьютерные технологии и программные средства [10], [6], [5]. В качестве основы использовались пироксилиновый порох – до 50 %, окислитель нитрат калия – 15 %. Металлическим горючим служил алюминий в виде порошка марки ПА-2, или магний марки МПФ-4, или

порошок титана марки ПТС – 25 %. Технологические добавки составляли 10 %. Перемешанный состав подвергался прессованию под удельным давлением 1500 кг/см^2 . Сжигание проводилось при комнатных условиях.

Результаты исследований и их обсуждение. Диспергирование, сопровождающее горение конденсированных систем, относится к сложным физико-химическим явлениям. Дисперсные частицы могут выноситься в пламя из-за неравномерной газификации зоны прогрева. В этом случае какая-то компонента состава, горючее или окислитель, легко газифицируется. Неравномерное распределение газифицирующей компоненты по объему создает условия усиленного диспергирования. Обломки исходного состава могут выноситься в пламя потоками газа-носителя. Размеры и форму частиц трудно прогнозировать. Скорость движения частиц зависит от их геометрических размеров. Развитая поверхность и большое миделево сечение частицы приводят к уменьшению относительной скорости газа-носителя и частицы. Размеры выносимых в пламя частиц могут быть изменены путем улучшения операции «мешки» и предварительного измельчения исходных порошков. Однако составы, включающие в себя частицы более мелкой фракции, горят по-другому. Увеличивается линейная скорость горения, а область локализации максимальной температуры приближается к поверхности горения.

Структура пламени горящих составов, содержащих металлическое горючее, например алюминий, совсем иная. Если температура горения поверхности конденсированной фазы ниже, чем температура воспламенения металла, то частицы воспламеняются только в высокотемпературной зоне пламени. До воспламенения они движутся в продуктах горения как исходные частицы в газовом потоке. Некоторые частицы металла на поверхности горения спекаются между собой и движутся как одно целое. Микрофотография такой частицы приведена на рис. 1. Размеры такого образования равны 1,3 мм, а составляющих – от 36 до 70 мкм.

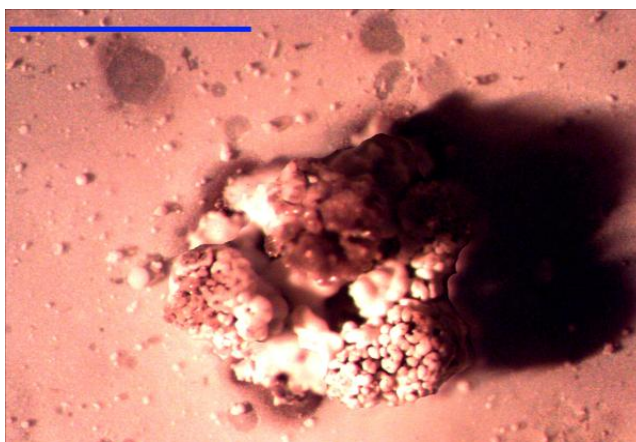


Рис. 1. Микрофотография крупного образования. Длина реперной линии 1 мм

Если температура горения поверхности конденсированной фазы выше температуры плавления металла, то исходная частица металла принимает форму сферы. Жидкие частицы алюминия склонны к агломерации, и в газовую фазу уже выносятся не частицы исходной формы, а целый набор сферических по форме частиц разных размеров. Функ-

ция распределения частиц по размерам определена многими исследователями, и она близка к закону нормального распределения [3], [2], [1], [9]. Агломерация частиц может быть уменьшена при увеличении скорости горения.

Концентрация дисперсных частиц возрастает при горении металлических частиц в пламени. В процессе горения материнская частица испаряется, и вокруг нее образуется парофазное пламя. Продукты горения металла, попадая в более «холодные» зоны пламени, конденсируются. Процесс формирования поверхности дочерней частицы и ее рост относятся к более сложным физико-химическим процессам. В экспериментах можно наблюдать появление облака дочерних частиц вокруг горящей металлической частицы. Многие исследователи пытаются определить точные границы зоны конденсации дочерних частиц [3], [2].

Частицы-комплексы при горении охвачены результирующим пламенем, который является огибающим первичных пламен, характерных для каждой составляющей частицы.

Между условной поверхностью частицы-комплекса и результирующим пламенем имеется свободное от дисперсных частиц пространство. Микрофотография осажденной на пробоотборник частицы-комплекса и график поглощения света облаком дочерних частиц приведены на рис. 2.

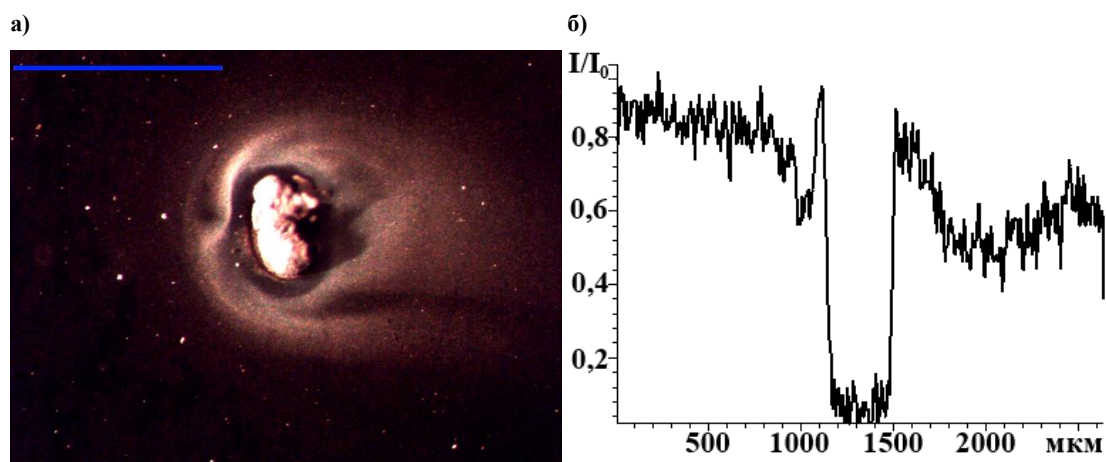


Рис. 2. Частица-комплекс: а) микрофотография частицы-комплекса с облаком дочерних частиц, б) поглощение света облаком дочерних частиц

При горении частиц-комплексов результирующее пламя может иметь сложную конфигурацию. При этом вокруг частицы может образоваться сложное облако дочерних частиц. Микрофотография частицы-комплекса в отраженных и поляризованных лучах приведена на рис. 3. Графики поглощения света облаком дочерних частиц позволяют определить внешние границы облака. На рис. 3 в пунктирными линиями указаны предполагаемые границы. Как видно из графиков, уровень поглощения для каждого выделенного облака различен. Можно полагать, что концентрация дисперсных частиц в каждом облаке также различна.

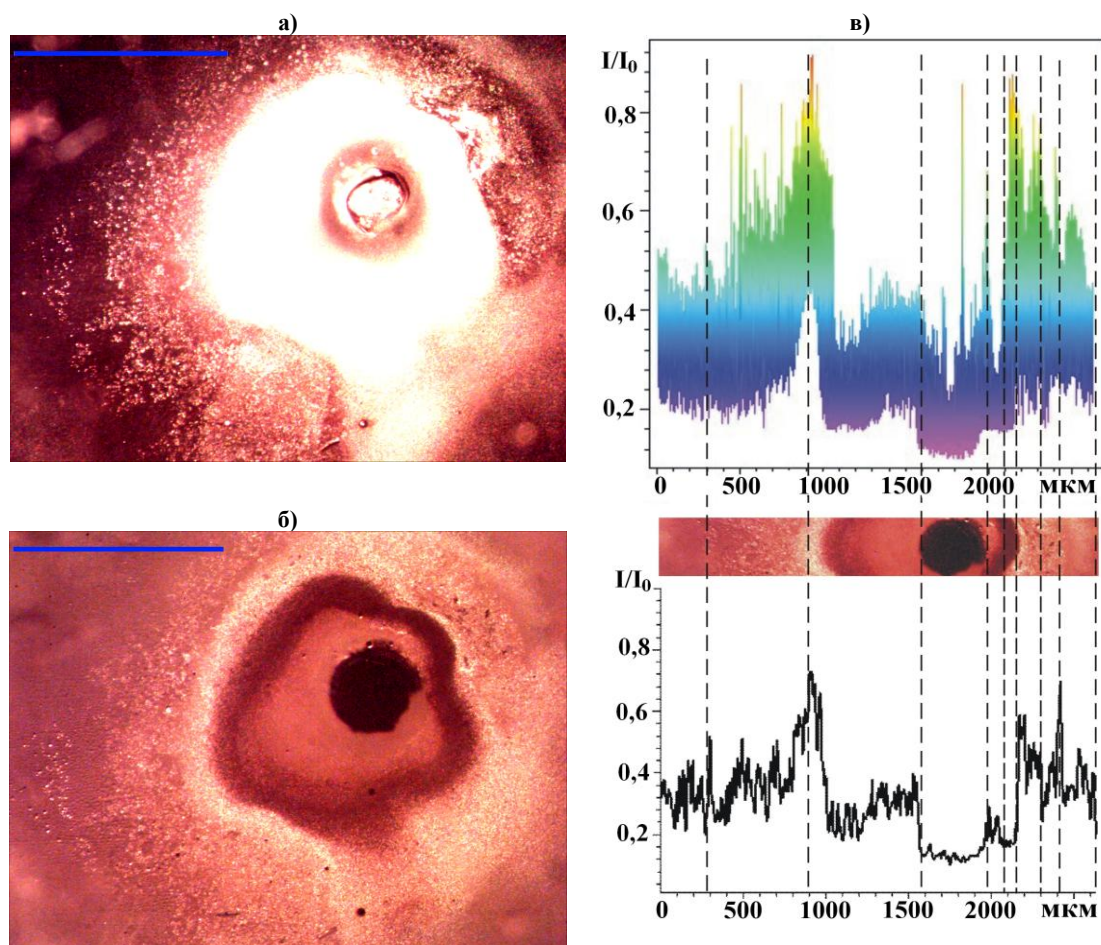


Рис. 3. Микрофотография частицы-комплекса титана: а) в отраженных лучах, б) в поляризованных проходящих лучах, в) поглощение света слоем облака дочерних частиц: верхний график – интегральная характеристика слоя, нижний график – поглощение слоя шириной в один пиксель

В идеальном случае вокруг сферической материнской частицы на расстоянии $2\div 3$ радиусов самой частицы образуется яркое парофазное пламя. Между пламенем и материнской частицей концентрация дисперсных частиц равна нулю. В конце горения металл полностью испаряется и остается тонкий кожух прежней частицы, состоящий из оксида металла.

При горении материнской частицы образуется почти сферической формы облако дочерних частиц. Движущаяся в продуктах горения материнская частица оставляет за собой шлейф дочерних частиц. Исходя из литературных данных и ранних исследований авторов [1], [4], для симметричного пламени рассчитано возможное поглощение света облаком дочерних частиц. Графическое распределение концентрации дочерних частиц в облаке вокруг материнской частицы радиусом R_p представлено на рис. 4 (кривая 2).

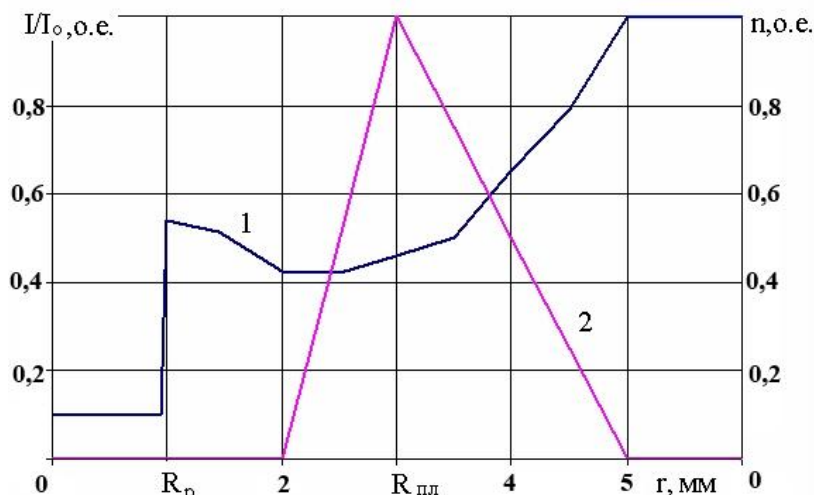


Рис. 4. Распределение числа частиц по радиусу (кривая 2) и относительное поглощение света вдоль радиуса материнской частицы (кривая 1)

Парофазное пламя стабилизируется на расстоянии $3R_p$, а концентрация дочерних частиц в модели уменьшается линейно в обе стороны от пламени. При $r = 5R_p$ концентрация частиц минимальна, а убыль концентрации при $r < R_{пл}$ более высокая, связанная с существующим потоком паров металла. В результате осаждения такой частицы на пробоотборнике поглощение света описывается кривой 1 (рис. 4). Кривая 1 получена в результате решения интегральных уравнений Абеля. Вид расчетной кривой и экспериментальных результатов (рис. 2б) показывает схожесть явлений при горении материнской частицы.

Исходя из описанной выше модели горячей частицы, рассчитана максимальная концентрация дочерних частиц в шаровом слое размерами $(2-5)R_p$. Выявлено, что численное значение максимальной концентрации дочерних частиц в шаровом слое не зависит от размеров материнской частицы, а определяется размером самих дочерних частиц. Такой результат получен в силу того, что пламя стабилизируется на определенном расстоянии от горячей частицы, а отношение объема шарового слоя к объему самой частицы одинаково для любого размера материнской частицы. Численные значения максимальной концентрации при полном сгорании металла в материнской частице приведены в таблице 1.

Таблица 1

Концентрация монодисперсных частиц в шаровом слое

$d_{доц}$, МКМ	0,4	1,0	2,0	4,0	10,0
$n_{max} \cdot 10^9, \text{ см}^{-3}$	382	24,5	3,06	0,38	0,024

Материнская частица в пламени омывается газовым потоком. Из-за разности скоростей движения материнской частицы и газового потока облако дочерних частиц рассеивается в пространстве. Для небольших скоростей движения можно считать, что число

рожденных дочерних частиц в единицу времени равно числу унесенных частиц из шарового слоя. Тогда концентрация дочерних частиц в таком динамическом равновесии почти постоянна во время горения материнской частицы. Для осесимметричного случая время горения частицы магния определяется уравнением $t_{гор} = 1,0 * d_p^2$, а алюминия – $t_{гор} = 2,75 * d_p^{1,4}$ [7]. Результаты расчетов приведены в виде графиков на рис. 5. По оси ординат отложены значения $\frac{dN}{dt}$ в логарифмическом масштабе, по оси абсцисс – размеры материнской частицы. Цифры у кривых показывают размеры дочерних частиц, указанных в мкм. Материнские частицы по «производительности» дочерних частиц, вне зависимости от природы металла, подразделяются на несколько групп. Частицы, размер которых более 950 мкм, относятся к группе малоэффективных частиц, размером менее 27 мкм – к группе высокоэффективных частиц. Эффективность других частиц занимает промежуточное значение (27÷115 мкм, 115÷950 мкм). Границы раздела определяются по точкам пересечения касательных, проведенных к кривым. Таким образом, при прогнозировании пиротехнического пламени можно руководствоваться определенными размерами исходных частиц.

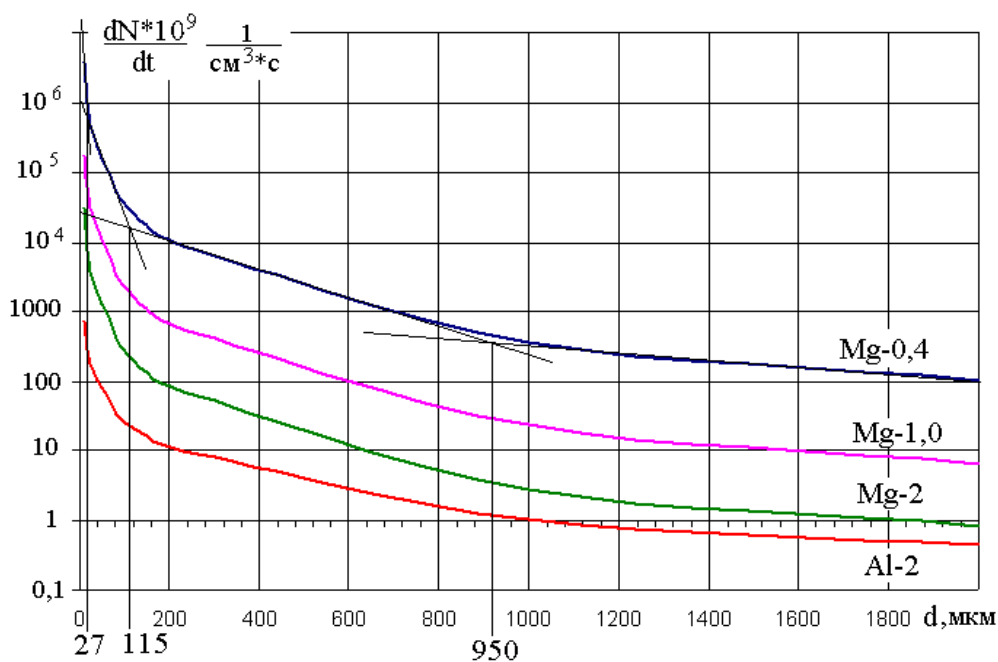


Рис. 5. Максимально возможная концентрация дочерних частиц вокруг материнской частицы при ее движении в потоке продуктов горения

В реальных пламенах внешняя поверхность частицы алюминия не ровная, имеются отслаивающиеся чешуйки и сквозные жерла. Из таких отверстий вырываются пары металла, что приводит к искажению сферической формы пламени. Движущаяся частица при

этом получает дополнительный момент импульса, что приводит к изменению траектории с поступательной на винтовую. Как правило, алюминий не полностью выгорает в пламени, и остатки металла обнаруживаются внутри полой сферы оксида.

В некоторых составах, перегруженных металлом, частицы алюминия не успевают агломерироваться на поверхности горения. Такие частицы-комплексы выносятся в пламя, а в высокотемпературной зоне часть частиц в комплексе может воспламениться. При этом парофазное пламя формируется на расстоянии 2–3 радиусов горячей частицы. Однако размеры частицы-комплекса намного больше радиуса горячей частицы. Поэтому соотношения между размерами пламени и частицы-комплекса иные, чем для одиночной частицы. Размеры возникающего облака дочерних частиц таковы, что поверхность частицы-комплекса покрыта тонким слоем частиц [4].

Движущаяся в продуктах горения горячая частица имеет иную скорость витания, чем инертная частица тех же размеров. Сила сопротивления, оказываемая на частицу со стороны продуктов горения, описывается законом Стокса:

$$F_c = 6\pi\eta\nu \cdot R_p.$$

Тогда скорость витания частицы может быть представлена в виде

$$\nu = \frac{2}{9} \rho_{\text{эф}} g \frac{r_{\text{эф}}^2}{\eta_{\text{эф}}}.$$

Здесь вместо радиуса частицы применен эффективный радиус, размеры которого соизмеримы с радиусом зоны горения. В этом случае «предполагаемая» частица движется не в газовой среде, а в некотором двухфазном потоке. Значение динамической вязкости определяется в пограничном слое среды облака дочерних частиц.

Приведем прикидочные расчеты для частицы размером $d_p = 1$ мм при скорости витания $\nu = 1$ м/с. Эффективный радиус частицы $r_{\text{эф}} = 3R_p = R_{\text{пл}}$, плотность вещества $\rho_{\text{эф}} = \rho_p / 3^3$.

Эффективная вязкость при движении материнской частицы облаком дочерних частиц равна $\eta_{\text{эф}} = \frac{2}{9} \rho_{\text{эф}} g \frac{r_{\text{эф}}^2}{\nu} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

При комнатной температуре динамическая вязкость воздуха $\eta = 18 \cdot 10^{-6}$ Па·с, воды $\eta = 0,82 \cdot 10^{-3}$ Па·с. С ростом температуры ($T = 2000$ К) вязкость воздуха увеличивается, $\eta = 63 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Сравнение экспериментальных данных с табличными показывает, что материнская частица с облаком дочерних частиц движется в вязкой среде, подобной жидкости.

При движении сферическая форма облака дочерних частиц деформируется и чаще всего принимает форму капли. Передний фронт облака приближается к поверхности материнской частицы. Тепловой режим в передней части становится другим, нежели на противоположной стороне материнской частицы.

Если концентрация материнских частиц велика, возникают контакты между облаками дочерних частиц. Такая консолидация частиц приводит к новому явлению. Скорости движения материнских частиц выравниваются между собой, а относительная скорость движения газовой составляющей внутри консолидированных частиц становится

равной нулю. Взаимодействие консолидации с окружающей средой происходит только по внешней поверхности. То есть рассеивание дочерних частиц происходит по внешней поверхности, а концентрация их внутри консолидации возрастает. Аналогичные результаты получены в работе Махвиладзе [8].

Резюме. В пламени существует многообразие дисперсных частиц. Скорость витания горящих дисперсных частиц определяется по эффективному размеру облака дочерних частиц, а не по размерам материнской частицы. Динамическая вязкость для движущейся частицы определяется по параметрам двухфазной среды, и она соизмерима с вязкостью жидких сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гремячкин, В. М.* Модель горения мелких капель металла / В. М. Гремячкин, А. Г. Истратов, О. И. Лейпунский // Физика горения и взрыва. – 1975. – Т. 11. – № 3. – С. 366–373.
2. *Григорьев, В. Г.* Экспериментальное исследование агломерации частиц алюминия при горении конденсированных систем / В. Г. Григорьев, В. Е. Зарко, К. П. Куценогий // Физика горения и взрыва. – 1981. – Т. 17. – № 3. – С. 3–10.
3. *Исследование* агломерации и диспергирования при горении модельных составов с большим содержанием порошкообразных металлов / Л. Я. Кашпоров и др. // Физика горения и взрыва. – 1975. – Т. 11. – № 1. – С. 33–43.
4. *Ксенофонтов, С. И.* Дисперсные частицы в продуктах горения порохов / С. И. Ксенофонтов, А. Н. Лепаев // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2012. – № 4 (76). – С. 90–96.
5. *Лепаев, А. Н.* Методы анализа ансамбля микроскопических частиц в продуктах горения конденсированных систем / А. Н. Лепаев, С. И. Ксенофонтов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2013. – № 4 (80). Ч. 2. – С. 103–110.
6. *Лепаев, А. Н.* Анализ частиц [Электронный ресурс] / А. Н. Лепаев, С. И. Ксенофонтов, А. М. Порфирьев // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – 2013. – № 11. – Режим доступа: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2013/11.doc>.
7. *Мальцев, В. М.* Основные характеристики горения / В. М. Мальцев, М. И. Мальцев, Л. Я. Кашпоров. – М.: Химия, 1977. – 320 с.
8. *Махвиладзе, Г. М.* Образование и горение газовых облаков при аварийных выбросах в атмосферу / Г. М. Махвиладзе, Дж. П. Робертс, С. Е. Якуш // Физика горения и взрыва. – 1997. – Т. 33. – № 2. – С. 23–38.
9. *Моделирование* процессов горения твердых топлив / Л. К. Гусаченко и др. – Новосибирск: Наука, 1985. – 182 с.
10. *Порфирьев, А. М.* Частица / А. М. Порфирьев, С. И. Ксенофонтов, А. Н. Лепаев // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – 2010. – № 6. – Режим доступа: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2010/6.doc>.