

УДК 621.181:662.9

А. В. Тымчик, канд. техн. наук

Н. А. Сафонов, канд. физ.-мат. наук

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, e-mail: matsevit@ipmach.kharkov.ua)

НАГРЕВ ЧАСТИЦ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ ПЛАЗМОЙ СВЧ-РАЗРЯДА

Представлена физическая и математическая модели нагрева частиц угольной пыли плазмой СВЧ-разряда атмосферного давления в потоке угольного аэрозоля. Вычисление температуры угольной частицы в зависимости от времени при её движении вместе с газовой средой сводится к решению задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения, моделирующего процесс нагрева одной угольной частицы. Для расчета распределения температуры в плазме СВЧ-разряда использовалось уравнение нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла. Считалось, что источником энергии является только джоулев нагрев, конвекция и теплопроводность представляются стоками энергии, в уравнении также не учитываются выделение энергии в объеме за счет сил вязкого трения, а также за счет сжатия-расширения объема. Представлены результаты численных исследований температур воздуха и частиц угля в разрядном объеме применительно к экспериментальной плазменно-угольной горелке.

Подана фізична і математична моделі нагрівання частинок вугільного пилу плазмою НВЧ-розряду атмосферного тиску в потоці вугільного аерозолю. Обчислення температури вугільної частинки залежно від часу під час її руху разом з газовим середовищем зводиться до розв'язання задачі Коші для звичайного диференціального рівняння, що моделює процес нагрівання однієї вугільної частинки. Для розрахунку розподілу температури в плазмі НВЧ-розряду використовувалося рівняння нестационарної теплопровідності з внутрішніми джерелами тепла. Вважалося, що джерелом енергії є тільки джоуліве нагрівання, конвекція і теплопровідність являють собою стоки енергії, в рівнянні також не враховуються виділення енергії в об'ємі за рахунок сил в'язкого тертя, а також за рахунок стиснення-розширення об'єму. Наведені результати чисельних досліджень температур повітря і частинок вугілля в розрядному об'ємі стосовно до експериментального плазмово-вугільного пальника.

Ключевые слова: СВЧ-разряд, угольная частица, плазменно-угольная горелка, задача Коши, скин-слой, плазмотрон, температурное поле, антрацит.

Введение

В публикациях, посвященных использованию СВЧ, а также ВЧ и дуговых разрядов для воспламенения низкорреакционных углей, как правило, рассматриваются вопросы выбора оптимальных режимов работы экспериментальных горелок, т. е. коэффициентов избытка воздуха, скоростей воздушных и аэрозольных потоков и т. п. [1–4]. В то же время физические и химические процессы, происходящие непосредственно в аэрозольных разрядах и имеющие ключевое влияние на эффективность плазменного воспламенения углей, остаются практически неизученными. Недавно в работах [5, 6] предпринята попытка использовать каналовую модель разряда (модель металлического цилиндра), широко применяемую для расчетов разрядных камер дуговых и высокочастотных плазмотронов [7, 8] для анализа условий воспламенения угольной пыли СВЧ-плазмой. При этом предполагалось, что воспламенение угольной пыли возможно тогда, когда выделившееся в скин-слое СВЧ-разряда тепло способно обеспечить нагрев до температуры воспламенения ($T_b \sim 1073$ К для антрацита) не менее 20% массы пыли, проходящей через разряд.

Математическая модель процесса

Для дальнейшего анализа динамики нагрева частиц угольной пыли, пролетающих через разрядный объем, разработана и представлена в [9] математическая модель температурного поля $T(r, z, t)$ в цилиндрической плазменной области $0 \leq r \leq r_0, 0 \leq z \leq z_0$

$$c\rho(T)\left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T)r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + W, \quad 0 < r < r_0, \quad 0 < z < z_0, \quad 0 < t < \tau, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0, \quad 0 < z < z_0, \quad 0 < t < \tau, \quad (2)$$

$$T(r_0, z, t) = T_0, \quad 0 < z < z_0, \quad 0 < t < \tau, \quad (3)$$

$$T(r, 0, t) = T_0, \quad 0 < r < r_0, \quad 0 < t < \tau, \quad (4)$$

$$T(r, z, 0) = T_0, \quad 0 < r < r_0, \quad 0 < z < z_0, \quad (5)$$

$$W = \begin{cases} 0, & 0 < r < r_1, \quad 0 < z < z_0, \quad 0 < t < \tau \\ \sigma E^2, & r_1 < r < r_0, \quad 0 < z < z_0, \quad 0 < t < \tau \end{cases}$$

где $T(r, z, t)$ – температура в точке с координатами (r, z) в момент времени t ; T_0 – температура газа в начальный момент времени $t = 0$; V_z – скорость газовой смеси в направлении оси цилиндра; $\lambda(T)$, $c(T)$, $\rho(T)$ – коэффициент теплопроводности, теплоёмкость и плотность газовой смеси соответственно; W – функция мощности источников тепла; σ – проводимость среды; E – напряжённость электрического поля; τ – конечное время процесса.

В модели (1)–(5) используется среднеквадратичная напряженность электрического поля на входе в плазменный волновод (E_0)

$$E_0 = \frac{11\sqrt{P}}{r_0 \sqrt{2 \ln \frac{R}{r_0}}},$$

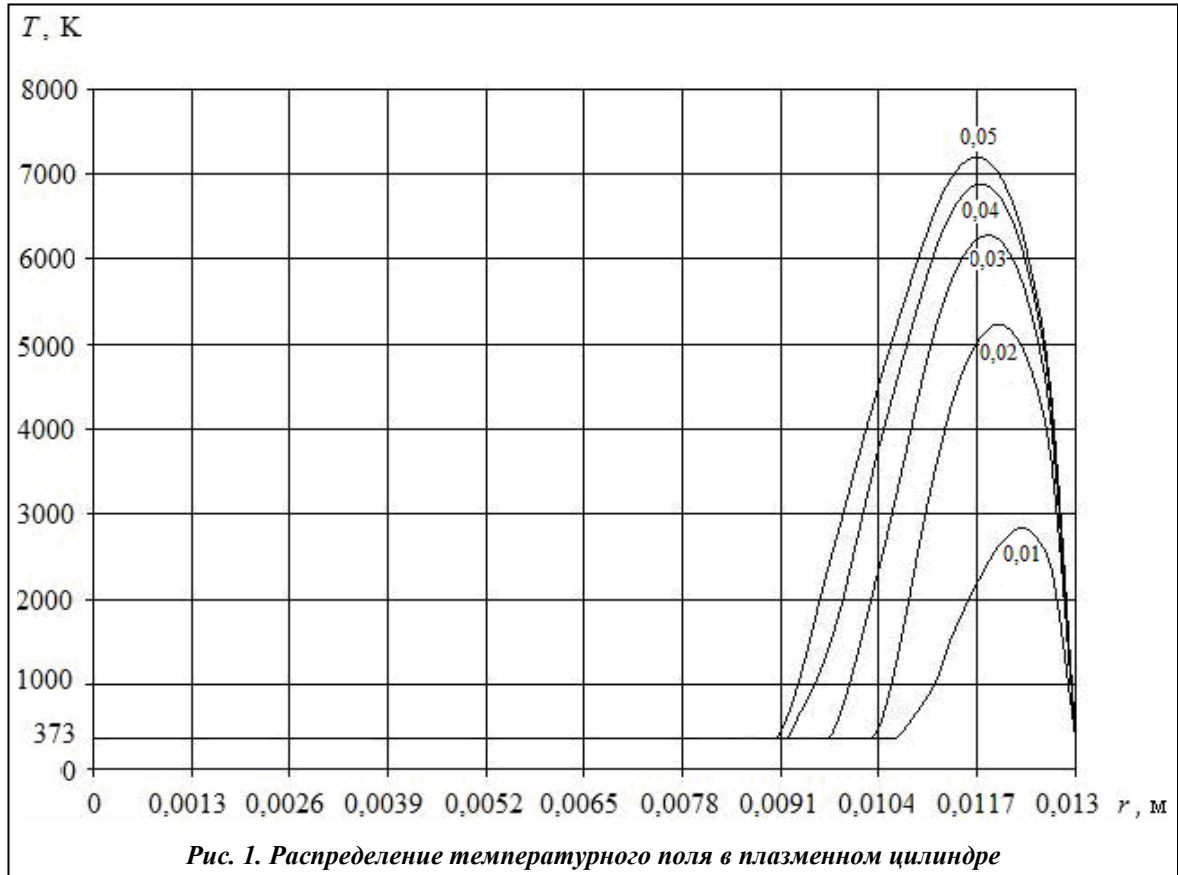
где P – СВЧ-мощность, поглощённая в разряде, которая может быть определена как мощность, необходимая для нагрева аэрозоля до температуры воспламенения, в последующих расчётах принятая равной мощности СВЧ-генератора; R – внутренний радиус внешнего электрода коаксиального плазматрона, r_0 – эффективный радиус разряда на границе зоны проводимости.

Эффективный радиус разряда в нашем случае можно принять равным радиусу внутреннего проводника коаксиального плазматрона, т. е. $r_0 \approx r$. Поток СВЧ-мощности через внешнюю поверхность разряда $S_0 = 0,00266 E_0^2$. Удельная мощность разряда $W = \frac{2S_0}{\delta} e^{-2x/\delta}$,

где, δ – толщина скин-слоя; x – текущая координата по радиусу разряда. Зависимости $\lambda(T)$, $c(T)$, $\rho(T)$ взяты из работы [10]. Начальные скорость, давление и температура угольного аэрозоля взяты из работы [4] и равняются соответственно 14 м/с, $1,1 \cdot 10^5$ Па, 393 К. Время пребывания угольных частиц в разрядном объеме составляет примерно 3,6 мс. Величины P , R , r равняются 5 кВт, 0,061 м и 0,013 м соответственно [4]. Результаты расчетов температурного поля в аэрозольном СВЧ-разряде для отношения $\delta/r = 0,3$ приведены на рис. 1, где числами возле кривых обозначено значение координаты z в метрах.

Вычисление температуры угольной частицы в зависимости от времени $T_q(t)$ при её движении вместе с газовой средой сводится к решению следующей задачи Коши [11] для обыкновенного дифференциального уравнения:

$$\frac{dT_q}{dt} = \frac{6Nu\lambda_r}{c_q\rho_q d^2} (T_r - T_q) + \frac{6\sigma_0\varepsilon}{c_q\rho_q d} (T_r^4 - T_q^4), \quad (6)$$



$$T_{\text{ч}}(0) = T_{\text{ч}0}, \tag{7}$$

где Nu – тепловой критерий Нуссельта; λ_r – коэффициент теплопроводности газа; $c_{\text{ч}}$, $\rho_{\text{ч}}$ – удельная теплоёмкость и плотность материала угольной частицы; d – диаметр угольной частицы; σ_0 – постоянная Стефана–Больцмана; ε – степень черноты угольной частицы.

В правой части (6) коэффициент теплопроводности λ_r зависит от температуры газа $T_{\text{ч}}$ [9], а значит, и от времени, поэтому обозначим её через переменную $f(t, T_{\text{ч}})$. Исходя из этого, перепишем задачу (6), (7) в следующем виде:

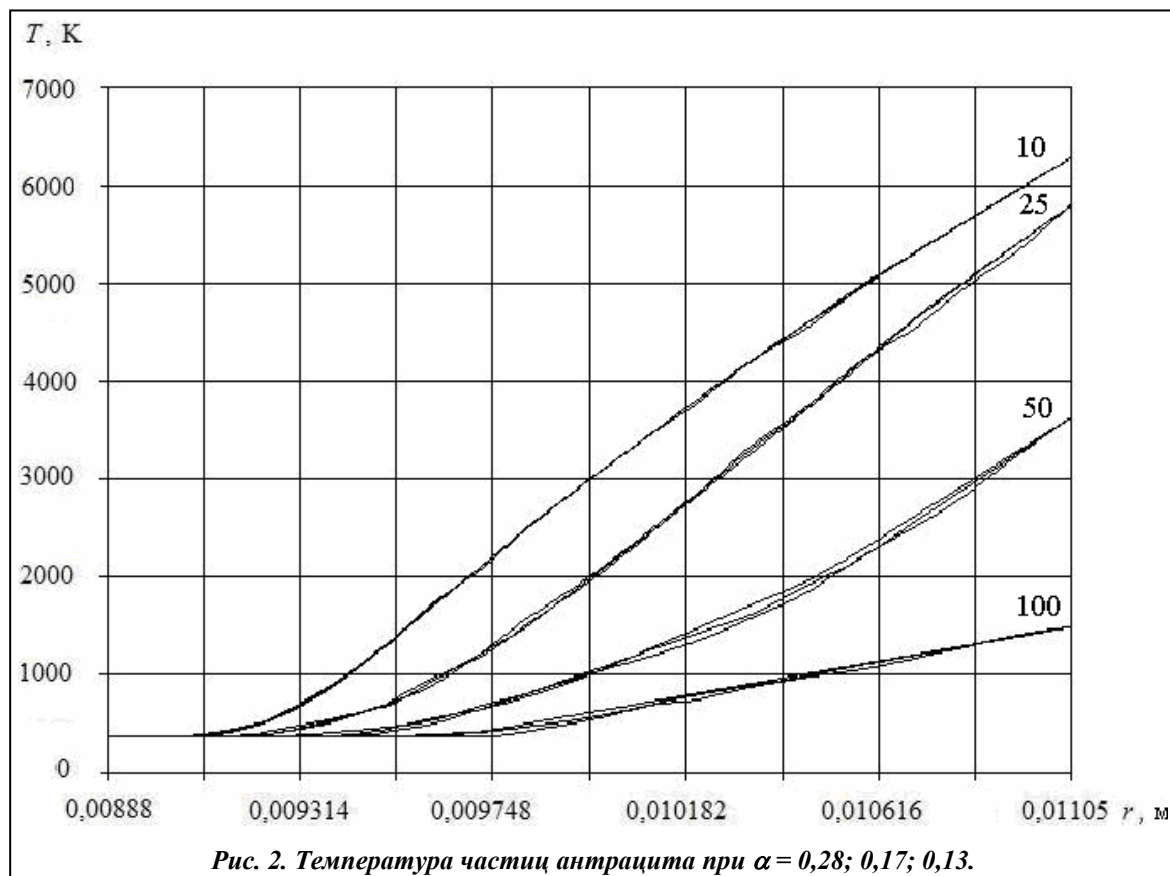
$$\frac{dT_{\text{ч}}}{dt} = f(t, T_{\text{ч}}), \quad T_{\text{ч}}(0) = T_{\text{ч}0}. \tag{8}$$

Построим временную сетку $t_l = l\Delta t$, $l = 0, 1, \dots, m$, $\Delta t = \tau/m$, где τ – время прохождения угольной частицей цилиндрического газового разряда, m – количество временных шагов. Так же, как и в статье [9], на этой сетке представим производную по времени в виде первой разностной производной $\left. \frac{dT_{\text{ч}}}{dt} \right|_{t=t_{l+1}} \approx \frac{T_{\text{ч}}^{l+1} - T_{\text{ч}}^l}{\Delta t}$. Теперь для решения задачи Коши (8)

используем метод Рунге–Кутты второго порядка (предиктор-корректор) [12]

$$\begin{aligned} \bar{T}_{\text{ч}}^{l+1} &= T_{\text{ч}}^l + f(t_l, T_{\text{ч}}^l)\Delta t, \\ T_{\text{ч}}^{l+1} &= T_{\text{ч}}^l + 0.5(f(t_l, T_{\text{ч}}^l) + f(t_{l+1}, \bar{T}_{\text{ч}}^{l+1}))\Delta t, \quad l = 1, \dots, m, \end{aligned} \tag{9}$$

где $T_{\text{ч}}^0 = T_{\text{ч}0}$. На каждом l -м шаге по времени вычисляется температура газа [9] и здесь же реализуется соответствующий шаг вычислительного процесса (9) при этом же l .



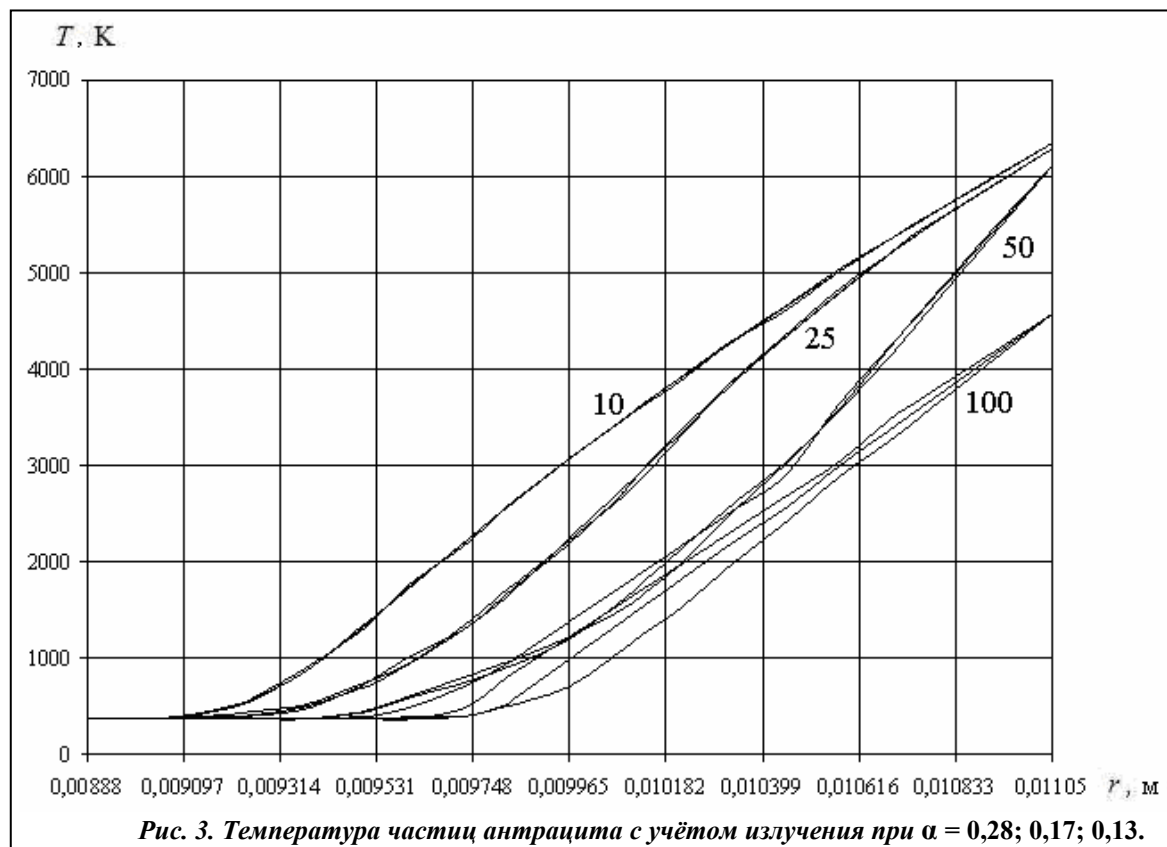
Результаты расчётов

На рис. 2 представлены графики зависимостей температуры частицы донецкого антрацита (марки АШ) при конвективном нагреве (первый член в правой части уравнения (6)) частиц угля для различных значений коэффициента избытка воздуха $\alpha = 0,28; 0,17; 0,13$ и для четырёх значений диаметра угольной частицы $d = 10, 25, 50, 100$ микрон. Числами возле кривых обозначен диаметр частицы в микронах. В зависимости от величины диаметра вы-

числяется расстояние между частицами по формуле [10] $L = d_{\text{ч}} \left(\frac{\pi \rho_{\text{ч}}}{6f \rho_r} \right)^{1/3}$, где $f = \frac{1}{\alpha L_0}$, L_0 –

стехиометрический коэффициент, а значит, и количество соответствующих частиц антрацита, двигающихся вместе с газовой средой параллельно друг другу вдоль оси цилиндрического разряда [13]. Из этих графиков можно сделать вывод, что чем больше диаметр угольной частицы, тем меньшее количество частиц нагревается до температуры воспламенения. Независимость температуры частиц от α объясняется постоянством времени пребывания пылевоздушной смеси в разрядном объеме, т. е. регулировка α производится только изменением расхода угольной пыли.

Рис. 3 отличается от предыдущего тем, что в данном случае угольные частицы подвергались радиационно-конвективному нагреву, то есть при решении задачи (8) учитывались оба члена в правой части уравнения (6). И хотя температуры частиц антрацита здесь несколько выше при прочих равных условиях, всё же видно, что пространственная граница для сгоревших и несгоревших частиц не изменилась. Количество частиц, нагретых до температуры воспламенения, осталось прежним. Здесь также числами возле кривых обозначен диаметр частицы в микронах.



Заключение

В работе [4] приведены результаты экспериментальных исследований по сжиганию пыли антрацита АШ в СВЧ-плазменной горелке, из которых следует, что воспламенившиеся в разряде частицы обеспечивают практически постоянную температуру продуктов сгорания (в том числе и по длине горелки) независимо от изменения расхода угля (коэффициент избытка воздуха). Незначительно отличается и химический состав продуктов сгорания на разных режимах работы горелки. Полученные результаты объясняются постоянной массой конвертируемого углерода и, следовательно, неизменным количеством выделившегося тепла, что свидетельствует о практически полном сгорании коксового остатка воспламенившейся массы угля. Отношение массы сгоревшего коксового остатка и массы углерода, содержащегося в угле, проходящем через разрядный объем, меняется в диапазоне 0,11–0,3 в зависимости от расхода угля. Экспериментальные результаты хорошо коррелируют с данными численных расчетов – постоянная масса конвертируемого углерода соответствует постоянному количеству воспламенившихся частиц (нагретых свыше 1000 К). Еще один вывод из проведенной работы – для увеличения количества воспламенившегося в разряде угля, а следовательно, и снижения удельных энергозатрат на поджиг необходимо расширять область высоких температур в чисто воздушном разряде, т. е. добиваться полного согласования СВЧ-разряда с генератором, при котором соотношение $\delta/r = 1$.

Литература

1. СВЧ-плазменная технология сжигания низкосортных углей / П. М. Канило, В. Е. Костюк, А. В. Тымчик и др. // Пробл. машиностроения. – 2004. – Т. 7, № 2. – С. 72–77.
2. Карпенко, Е. И. Введение в плазменно-энергетические технологии использования твердых топлив / Е. И. Карпенко, В. Е. Мессерле. – Новосибирск: Наука, 1997. – 119 с.
3. Плазменный поджиг высокозольных антрацитов при их факельном сжигании / Ю. П. Кукота, Д. Л. Бондзик, Н. И. Дунаевская и др. // Пром. теплоэнергетика. – 2004. – № 6. – С. 146–151.
4. О механизме взаимодействия СВЧ-разряда с пылеугольным потоком / Д. М. Ваврив, А. В. Тымчик, А. И. Ивановский и др. // Пробл. машиностроения. – 2006. – Т. 5, № 1. – С. 85–90.

5. *Тымчик А. В.*, Воспламенение угольной пыли плазмой СВЧ-разряда / А. В. Тымчик // Пробл. машиностроения – 2009. – Т. 7, № 3. – С. 72–77.
6. *Тымчик А. В.*, Условия воспламенения угольной пыли плазмой СВЧ-разряда / А. В. Тымчик // Пробл. машиностроения. – 2011. – Т. 7, № 2. – С. 69–71.
7. *ВЧ- и СВЧ-плазмотроны* (Низкотемпературная плазма; Т. 6) / С. В. Дресвин, А. А. Бобров, В. М. Лелевкин и др. – Новосибирск: Наука, 1992. – 319 с.
8. *Дресвин С. В.*, Основы теории и расчёта ВЧ-плазмотронов / С. В. Дресвин. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 312 с.
9. *Тымчик А. В.* СВЧ-разряд в потоке угольного аэрозоля / А. В. Тымчик, Н. А. Сафонов // Пробл. машиностроения – 2012. – Т. 15, № 1. – С. 60–65.
10. *Райзер, Ю. П.* Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
11. *Основы практической теории горения: Учеб. пособие* / В. В. Померанцев, К. М. Арэфьев, Д. Б. Ахметов и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 310 с.
12. *Бахвалов, Н. С.* Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М.: Наука, 1987. – 600 с.
13. *Власов, В. И.* Сублимация частиц углерода в плазменном потоке, генерируемом в высокочастотном индукционном плазмотроне / В. И. Власов, Г. Н. Залогин, А. Л. Кусов // Журн. техн. физики. – 2007. – Т. 77, вып. 1. – С. 1–7.

Поступила в редакцию
14.01.14