

В.И. Букатый, А.Е. Каплинский, А.М. Шайдук, И.А. Суторихин

ДИНАМИКА РАДИУСА И ТЕМПЕРАТУРЫ ЧАСТИЦЫ ВЛАЖНОГО УГЛЕРОДНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ ЕЕ ГОРЕНИИ В МОЩНОМ ОПТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Приведены данные расчетов зависимостей радиуса и температуры углеродной аэрозольной частицы от времени при ее горении в поле мощного лазерного излучения в условиях влажного воздуха. Показано, что горение протекает быстрее, чем в сухом воздухе. Процесс горения частицы наблюдался также экспериментально, получено качественное согласие с результатами расчетов. Обнаружен выраженный тепловой ореол вокруг частицы, связанный с горением водорода, образовавшегося при реакции углерода с водяным паром.

Распространение мощного лазерного излучения в атмосфере, содержащей частицы углерода, исследовалось во многих работах без рассмотрения вопроса о влиянии на процесс атмосферной влаги. Между тем, как показывают наши расчеты [1, 2], скорость горения частицы в поле излучения при наличии водяного пара выше, чем в сухом воздухе, что непосредственно сказывается на скорости просветления среды. В указанных работах рассчитана скорость горения как величина, характеризующая скорость убыли массы углерода с единицы поверхности частицы в единицу времени. На основе результатов [1, 2] в настоящей работе определены временные зависимости радиуса $a(t)$ и температуры поверхности частицы $T_s(t)$ в процессе горения в поле излучения известной интенсивности I с использованием законов сохранения массы и энергии.

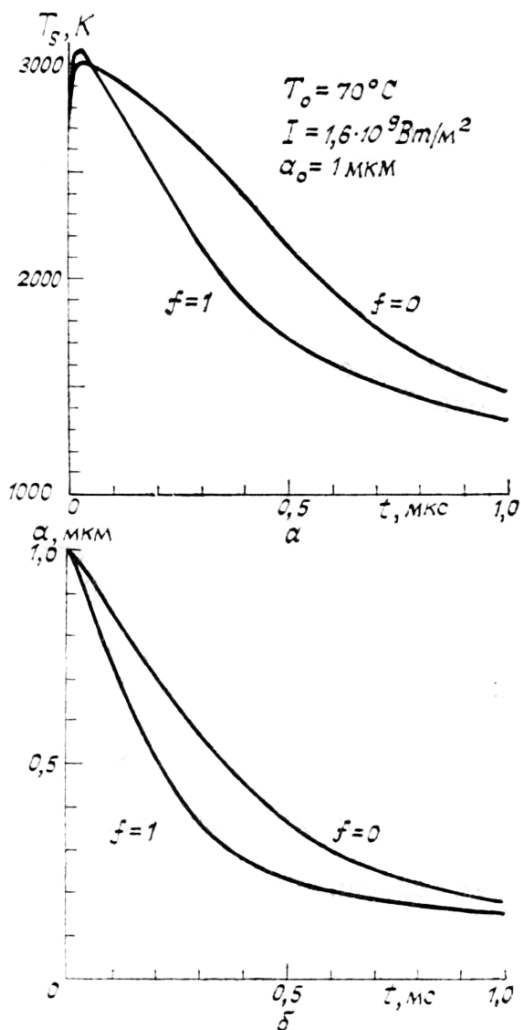


Рис. 1. Результаты расчета $T_s(t)$ (а) и $a(t)$ (б) для $T_0 = 70^\circ\text{C}$, $I = 1,6 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$, $a_0 = 1 \text{ мкм}$

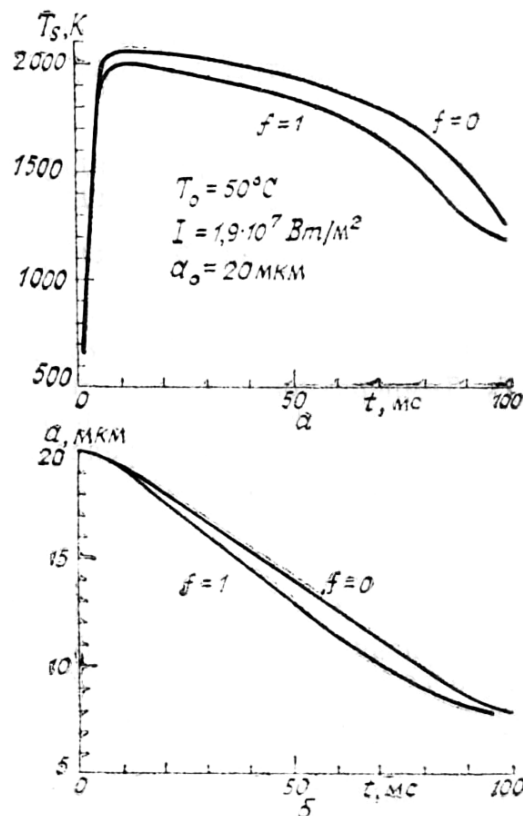


Рис. 2. Результаты расчета $T_s(t)$ (а) и $a(t)$ (б) для $T_0 = 50^\circ\text{C}$, $I = 1,9 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$, $a_0 = 20 \text{ мкм}$

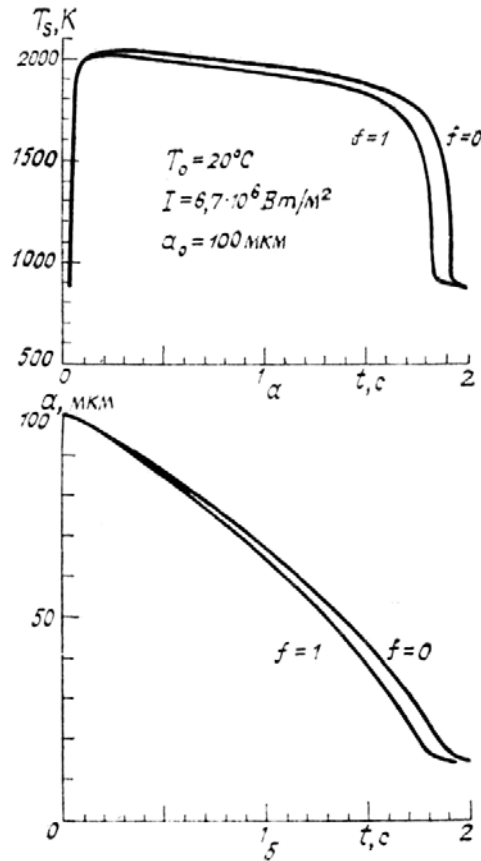


Рис. 3. Результаты расчета $T_s(t)$ (а) и $a(t)$ (б) для $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $I = 6,7 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, $a_0 = 100 \text{ мкм}$

Закон сохранения полной массы углерода приводит к уравнению

$$\frac{da}{dt} = -\frac{K(a, T_s)}{\rho}, \quad (1)$$

а закон сохранения энергии — к уравнению

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{3}{4a\rho C_p} \left[\kappa_n(a) I + 4Q(a, T_s) K(a, T_s) - \frac{4}{a} \int_{T_0}^{T_s} \mu(\xi) d\xi - 4\sigma (T_s^4 - T_0^4) \right], \quad (2)$$

где ρ и C_p — соответственно плотность и удельная теплоемкость вещества частицы; $K(a, T_s)$ — скорость горения частицы, $\text{кг/м}^2\text{с}$; $\kappa_n(a)$ — фактор эффективности поглощения, I — интенсивность излучения; $Q(a, T_s)$ — удельный тепловой эффект комплекса реакций горения; T_0 — температура воздуха вдали от частицы; $\mu(T)$ — коэффициент теплопроводности воздуха; a — постоянная Стефана—Больцмана. Начальные условия задачи: $a(0) = a_0$, $T_s(0) = T_0$. Скорость горения $K(a, T_s)$ найдена в работах [1, 2] как для мелких частиц, когда можно пренебречь гомогенной реакцией догорания СО в окрестности частицы, так и для крупных, когда начинает сказываться догорание СО. В то же время влияние гомогенной реакции на скорость горения невелико, хотя парциальные давления реагентов могут значительно меняться. Поэтому для расчетов можно использовать формулу для $K(a, T_s)$, полученную в приближении гетерогенного горения [1]. Заметим, что необходимо выполнение условия, обеспечивающего режим догорания водорода, выделяющегося в реакции углерода с водяным паром, в тонком шаровом слое вокруг частицы. Это условие обсуждено в [2] и имеет вид

$$a \frac{\alpha(T_s) p_{\text{H}_2\text{O}}}{D(T_s) p_{\text{O}_2}} < 1, \quad (3)$$

где $D(T_s)$ — эффективный коэффициент диффузии в окрестности частицы [2]; $\alpha(T_s)$ — константа реакционного газообмена $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$, $p_{\text{H}_2\text{O}}$ и p_{O_2} — соответственно парциальные давления

H₂O и O₂ вдали от частицы.

Тепловой эффект $Q(a, T_s)$ выражается через удельные тепловые эффекты гетерогенных реакций $2C + O_2 \rightarrow 2CO$, $C + O_2 \rightarrow CO_2$ и потоки CO и CO₂, формулы для которых получены в [1].

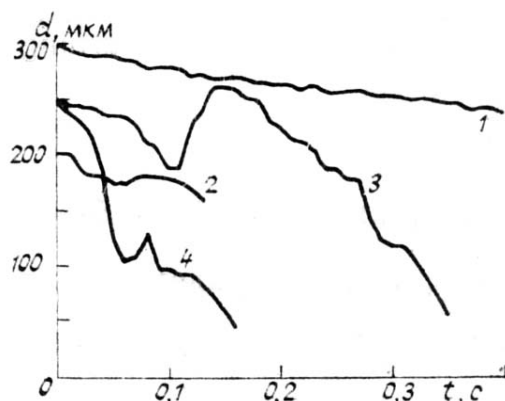


Рис. 4. Результаты обработки кинограмм процесса горения частицы: 1, 2 — в сухой атмосфере; 3 — во влажной атмосфере, $T_0 = 67^\circ\text{C}$; 4 — во влажной атмосфере, $T_0 = 75^\circ\text{C}$

Результаты численных расчетов изображены на рис. 1–3. Выбраны такие значения параметров процесса, которые позволяли бы менять относительную влажность воздуха f от 0 до 1 для частиц различных размеров с соблюдением условия (3). Чем выше абсолютная влажность воздуха, тем заметнее различие кривых $a(t)$ и $T_s(t)$ в «сухом» и «влажном» случаях. Наличие влаги приводит к ускорению горения. Максимальная температура в случае мелких частиц слегка увеличивается, а для более крупных — уменьшается. В расчетах использована заранее вычисленная по модели [3] зависимость $\kappa_n(a)$ для длины волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм, комплексный показатель преломления углерода взят равным $1,95 - i0,66$ [4].

Для проверки результатов расчета были приведены эксперименты по регистрации процесса горения частицы методом скоростной киносъемки. Сажистые частицы устанавливались на торце кварцевой нити в специальной камере, в которой находились нагреватель и испаритель. Через окно в камеру вводилось непрерывное излучение от лазера ЛТН-102 с длиной волны 1,06 мкм, которое фокусировалось линзой на частицу. Перед воздействием воздух в камере подогревался до $60 - 80^\circ\text{C}$ и затем включался испаритель. Когда в камере достигалась высокая влажность воздуха (близкая к $f = 1$), включался электромагнитный затвор и мощное излучение падало на частицу. Интенсивность излучения I была порядка 10^7 Вт/м². Процесс горения регистрировался скоростной кинокамерой СКС-1м.

Результаты обработки нескольких кинограмм приведены на рис. 4. Кривые 1, 2 соответствуют горению частиц, в сухом воздухе при комнатной температуре, кривые 3, 4 — горению во влажном воздухе при повышенной температуре. Измерение диаметра частиц велось до момента отрыва частицы от нити и исчезновения ее из поля зрения. При экспериментах во влажном воздухе была отмечена их частичная фрагментация, после чего видимый диаметр светящейся частицы увеличивался за счет образования оптически заметного теплового ореола (кривая 3). Вероятной причиной фрагментации является быстрое испарение влаги, адсорбированной во внешних слоях частицы. Образовавшийся ореол скрывал истинный размер частицы и уменьшался в размере в ходе ее горения. В конце процесса температура частицы понижается, ореол становится слабее, и контур частицы становится снова видимым (на кривой 3 при $t > 0,3$ с). При горении в сухом воздухе ореол становится менее выраженным. Наличие более заметного ореола во влажном воздухе объясняется, по-видимому, горением водорода, образовавшегося вблизи поверхности частицы. Этот процесс, как показывают оценки, происходит вокруг частицы в слое, сравнимом по толщине с размерами частицы (условие (3) не выполняется). В этом слое выделяется большое количество тепла, что существенно влияет на профиль показателя преломления газовой среды. Скорость уменьшения радиуса частицы, как видно из результатов, во влажном воздухе больше, чем в сухом, что согласуется качественно с расчетными данными.

1. Букатый В. И., Каплинский А. Е., Шайдук А. М. // IV Всесоюз. совещ. по распространению лазерного излучения в дисперсной среде. (Тезисы докл.). Т. II. Обнинск, Барнаул, 1988. С. 229–232.
2. Букатый В. И., Каплинский А. Е., Шайдук А. М. Горение углеродной частицы в поле мощного лазерного излучения при повышенной влажности воздуха. Деп. в ВИНТИ 29.12.88. № 9154-B88.
3. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
4. Kattawar G. W., Hood D. A. // Appl. Opt. 1976. V. 15. № 8. P. 1996.

V. I. Bukaty, A. E. Kaplinskii, A. M. Shaiduk, I. A. Sutorikhin. **The Dynamics of Radius and Temperature of a Wet Carbon Aerosol Particle Burnt in an Intense Optical Field.**

The time dependence of radius and temperature of a carbon aerosol particle burning in an intense laser radiation field in humid air was calculated. It is shown that the burning flows more rapidly than in a dry air. The process of the particle burning was observed experimentally and the qualitative agreement with calculational results was obtained. The thermal halo around the particle was found to be connected with the process of hydrogen burning that is generated in the reaction of carbon with water vapor.