

CO + He, рассчитанная в приближении модели мгновенного перемешивания потоков O + O₂ + Ar и CO + CO₂ + He). Дальнейшее увеличение концентрации в пределах $\xi'_{\text{CO}_2} = 0,03 \div 0,08$ привело к снижению коэффициента усиления с 1,3 до 0,6 м⁻¹. Поскольку скорость реакции O + CO₂ → CO + O₂ мала, введение «холодных» молекул CO₂ в смесь, инжестируемую из полости клапана, мало влияет на химическое равновесие в системе. Наблюдаемое снижение величины K₀ с ростом ξ'_{CO_2} связано, таким образом, с участием молекул CO₂, введенных в смесь CO + He, в релаксационных V-T- и V-V'-процессах.

Таким образом, в данной работе реализована химическая накачка уровней асимметричной моды молекул CO₂, заселяемых в ходе реакции рекомбинации CO + O + M. Получена инверсия заселенностей в системе уровней (00⁰1—10⁰0) молекул CO₂, образующихся при протекании этой реакции в условиях смесительного ГДЛ.

Поступила в редакцию 15/IX 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Бирюков. Тр. ФИАН, т. 83. М.: Наука, 1975.
2. Т. Каррингтон, Д. Гарвин.— В сб.: Возбужденные частицы в химической кинетике. М.: Мир, 1973.
3. R. K. Koopmann, A. R. Saunders. J. Quant. Spectr. Rad. Trans., 1970, 10, 403.
4. J. D. Anderson. Phys. Fluids, 1970, 13, 1983.
5. В. Н. Крошко, Р. И. Солоухин, Н. А. Фомин.— В сб.: Газовые лазеры. М.: Наука, 1977.
6. М. Г. Кталхерман, В. М. Мальков и др. ФГВ, 1979, 15, 6.
7. V. F. Myers, E. R. Burtle. J. Chem. Phys., 1968, 48, 9, 3935.
8. А. П. Правилон. ЖФХ, 1978, 52, 8, 1863.
9. M. A. Clyne, V. A. Thrush. Proc. Roy. Soc., London, 1962, A269, 404.
10. F. R. Gilmore. J. Quant. Spectr. Rad. Trans., 1965, 5, 369.
11. Н. И. Кудрявцев, С. С. Новиков, И. Б. Светличный. Квант. электроника, 1979, 6, 4, 690.
12. В. З. Компаниец, А. А. Овсянников, Л. С. Полак. Химические реакции в турбулентных потоках газа и плазмы. М.: Наука, 1979.
13. В. Н. Кондратьев. Константы скоростей газозольных реакций. М.: Наука, 1974.
14. D. L. Baulch, D. D. Drysdale, O. G. Horne. Evaluated Kinetic Data for High Temperature Reactions. Vol. 1, 2. Butterworths, 1972.
15. Н. И. Кудрявцев, С. С. Новиков.— В сб.: Матер. II Всесоюз. конф. по методам аэрофизических исследований. Новосибирск, 1979.

УДК 551.573

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СО₂-ЛАЗЕРА НА УГЛЕРОДНЫЕ ЧАСТИЦЫ

В. И. Букагый, И. А. Суторин
(Барнаул)

В задачах распределения мощной оптической радиации через аэродисперсные среды часто реализуется случай, когда процессы взаимодействия излучения с аэрозольными частицами происходят независимо друг от друга. В связи с этим определенный научный и практический интерес представляют исследования динамики горения одиночных твердых горючих частиц в поле излучения СО₂-лазера, изменения размеров которых в основном определяют динамику прозрачности аэрозоля.

Качественные результаты экспериментов по горению одиночных твердых аэрозольных частиц под действием излучения СО₂-лазера при интенсивностях (130—210) · 10⁴ Вт/м² приведены в работе [1]. В данном со-

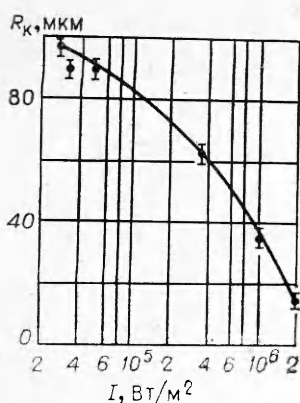


Рис. 1. Зависимость критического радиуса R_k от воздействующей интенсивности I .

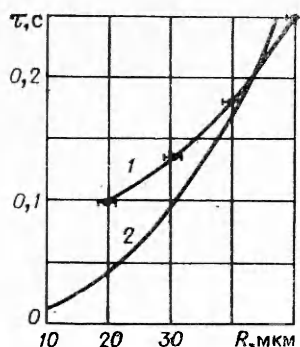


Рис. 2. Зависимость характерного времени сгорания τ сажистых частиц от их размеров в поле излучения CO_2 -лазера с $I = 2,1 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$.

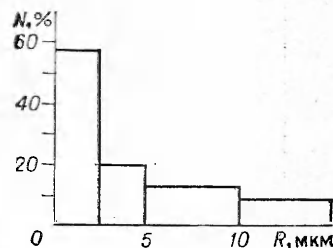


Рис. 3. Гистограмма распределения по размерам фрагментированных частиц угля.

общении приводятся количественные характеристики процессов горения одиночных углеродных частиц с радиусами от 20 до 250 мкм в результате действия на них непрерывного лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм в интервале плотностей потоков энергии $10^4 - 2,1 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$.

Исследования проводились с использованием серийного CO_2 -лазера типа ЛГ-25, работающего в одномодовом режиме, на установке, описанной в [2]. Использовались частицы гранулированной сажи ПМ-75 и частицы экибастузского каменного угля, которые устанавливались на плоскую алюминиевую подложку, имеющую высокий коэффициент отражения инфракрасного излучения на длине волны $\lambda = 10,6$ мкм.

Результаты опытов показали, что определенной интенсивности воздействующего излучения соответствует конкретный критический размер углеродных частиц, для которых воспламенения не происходит. В области критических размеров зависимость среднеэффективного размера частицы от времени имеет нелинейный характер. Средняя скорость изменения радиуса после воспламенения частиц с начальным радиусом $R_0 \sim 21,5$ мкм в поле излучения CO_2 -лазера с интенсивностью $I = 2,1 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ имеет величину порядка 120 мкм/с, а через 25 мс уменьшается до 8,5 мкм/с. Для частиц с радиусами $R \gg R_0$ зависимость $R(t)$ носит линейный вид.

На рис. 1 приведен график зависимости критического радиуса от величины интенсивности воздействующего излучения. Для полученной экспериментальной зависимости с точностью не хуже 3% можно записать соотношение $IR_k = \text{const}$, где I — интенсивность воздействующего излучения; R_k — критический радиус частицы.

Зависимость характерного времени сгорания сажистых частиц в поле излучения CO_2 -лазера от величины радиуса приведена на рис. 2, 1. Кривая 2 получена на основании расчета по формуле [3]

$$\tau = 3\rho_0 R_0^2 / 4\beta c_0 D_0 (T_{\text{п}}/T_0)^{1/2},$$

где τ — характерное время горения; ρ_0 — плотность углеродной частицы; β — отношение массы атома углерода к массе молекул кислорода; c_0 — концентрация кислорода на бесконечности; D_0 — коэффициент диффузии при $T = T_0$; T_0 — температура окружающей среды; $T_{\text{п}}$ — температура поверхности частицы. При использовании метода наименьших квадратов для экспериментальной кривой с погрешностью не хуже 2% получена ап-

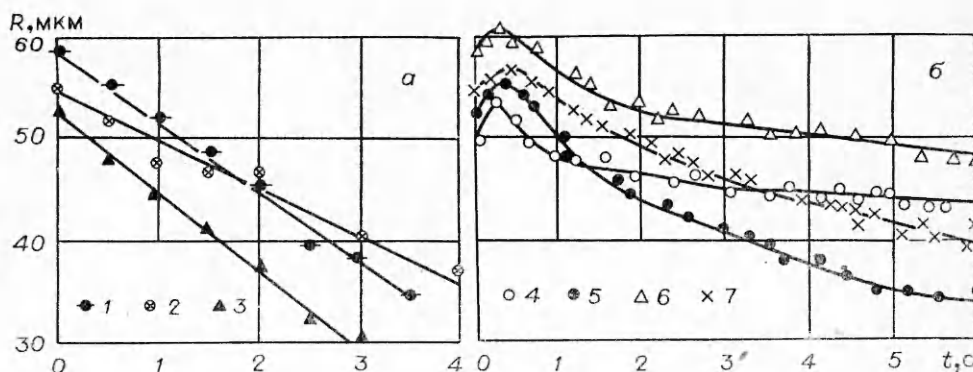


Рис. 4. Динамика изменения радиусов горящих сажистых (а) и угольных частиц (б) при различных давлениях воздуха в кювете.
 1 — $R_0=59$ мкм, $p=830$ ГПа; 2 — $R_0=55$ мкм, $p=500$ ГПа; 3 — $R_0=53$ мкм, атмосферное давление; 4 — $R_0=49$ мкм, $p=500$ ГПа; 5 — $R_0=51$ мкм, атмосферное давление; 6 — $R_0=58$ мкм, $p=700$ ГПа; 7 — $R_0=54,5$ мкм, $p=1250$ ГПа.

проксимационная зависимость $\tau = -0,016 + 0,005R$. Доверительные интервалы на графике определены с надежностью 0,95.

Для частиц экибастузского каменного угля при их горении в поле лазерного излучения с $I = 2,1 \cdot 10^6$ Вт/м² в начальный момент воздействия за время $\approx 0,1$ с зарегистрировано увеличение размера частиц, а также их фрагментация. График зависимости $R(t)$ для угольных частиц приведен в [2]. Анализируя эту зависимость, можно условно весь процесс горения угольной частицы разделить по времени на три этапа. На первом происходит разбухание частицы и разогрев ее до воспламенения, на втором — горение и фрагментация, на третьем этапе характерно образование шлакового остатка, который при интенсивностях $I \approx 0,7 \cdot 10^6$ Вт/м² и выше стягивается в сферу.

Так же как и для сажистых частиц, для частиц угля существуют предельные начальные размеры, при которых частицы перестают воспламеняться, но тем не менее некоторое разбухание частицы все же происходит. Так, например, при $I_k = 3,9 \cdot 10^5$ Вт/м² предельный радиус составил $R_k \approx 95$ мкм и увеличение размера после воздействия составило 0,8%. При интенсивностях $I < 0,8I_k$ разбухания зарегистрировано не было.

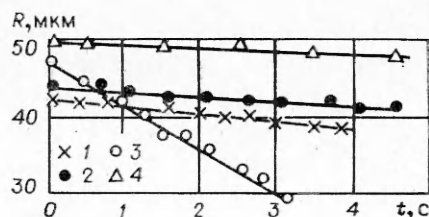
На рис. 3 показана гистограмма распределения по размерам фрагментированных частиц при действии на исходную угольную частицу с $R_0 = 110$ мкм излучения с $I = 0,7 \cdot 10^6$ Вт/м². Вид гистограммы при постоянной интенсивности от размера исходной частицы практически не зависит, в то время как при вариациях плотности мощности воздействующего излучения наблюдается отклонение от полученного распределения. Проведенный предварительный химический анализ показал, что в состав фрагментированных частиц входят капли каменноугольной смолы.

Исследования динамики горения углеродных частиц в различных газовых средах при действии на них инфракрасного излучения с $\lambda = 10,6$ мкм проводились с использованием герметизированной кюветы с окнами из CsI. Частицы, как и в предыдущих случаях, устанавливались в кювете на алюминиевую подложку. На рис. 4, а приведен ход зависимости среднеэффективного радиуса сажистых частиц от времени при пониженных давлениях воздуха в кювете. Обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов дала линейную зависимость $R(t)$. Интенсивность воздействующего излучения $I = 0,7 \cdot 10^6$ Вт/м².

С уменьшением давления в кювете, а следовательно, и объемной концентрации окислителя (кислорода) зарегистрировано уменьшение скорости горения сажистых частиц. Так, средняя скорость изменения радиуса частицы с $R_0 = 59$ мкм при давлении 830 ГПа составила $6,86 \cdot 10^{-6}$ м/с, для частицы с $R_0 = 55$ мкм при $p = 500$ ГПа — $4,75 \cdot 10^{-6}$ м/с, в то время как при нормальном атмосферном давлении для частицы с $R_0 = 53$ мкм

Рис. 5. Зависимость $R(t)$ для сажистых частиц, находящихся в азотной среде при различных давлениях.

1 — $R_0=42$ мкм, азот, $p=1080$ ГПа; 2 — $R_0=44$ мкм, азот, $p=1050$ ГПа; 3 — $R_0=47$ мкм, воздух, атмосферное давление; 4 — $R_0=49$ мкм, азот, $p=1200$ ГПа.



средняя скорость горения была заметно больше и равнялась $7,67 \cdot 10^{-6}$ м/с. Измерения интервала времени Δt от начала воздействия излучения до начала свечения частицы показали, что для частиц одного размера указанные выше вариации давления в кювете на величину Δt заметного влияния не оказывают. Для опыта с частицами (размеры см. рис. 4) $\Delta t \approx 15$ мс. Опыты по горению частиц каменного угля в воздухе при различных давлениях и $I = 7 \cdot 10^5$ Вт/м² (рис. 4, б) показали, что эффект разбухания частиц, который связан с выходом каменноугольных смол и летучих, коррелирует с изменением давления в кювете.

Эксперименты по воздействию излучения CO_2 -лазера с $I = 0,7 \cdot 10^6$ Вт/м² на углеродные частицы, находящиеся в среде с пониженным содержанием кислорода (точно концентрацию O_2 измерить не удалось), которое достигалось путем продувания через объем кюветы азота в течение $t \sim 1 \div 1,5$ ч, показали, что угольные частицы указанных размеров не воспламенялись. Для частиц сажи ПМ-75 в этих условиях наблюдалось увеличение критического размера примерно в 1,5 раза. Средняя скорость изменения радиуса горящей частицы с начальным радиусом $R_0 = 42$ мкм составила $0,5 \cdot 10^{-6}$ м/с. Типичная зависимость для сажистых частиц в азотной среде приведена на рис. 5.

Наличие горения в последнем случае обусловлено, по-видимому, тем обстоятельством, что кислород при продувании азота через кювету полностью не удалится, однако при этом следует иметь в виду данные работы [4], в которой приведены результаты по горению конгломератов сажи и крупных частиц графита в условиях вакуума.

Для выяснения влияния на процесс горения и фрагментации влаги и легкоиспаряющихся веществ, содержащихся в углеродных частицах, проведена серия соответствующих экспериментов. Процент содержания легкоиспаряющихся веществ в частицах определялся их высушиванием в муфельной печи при температуре 473 К в течение 6 ч и доведением тигля с навеской до постоянной массы. После многократных измерений с различными навесками определялось процентное содержание легкоиспаряющихся веществ в частицах. Для сажистых частиц эта величина составила 0,3%, для частиц экибастузского угля — 0,1%. Эксперименты по воздействию излучения на углеродные частицы, подвергнутые высушиванию, показали, что динамика процесса горения и фрагментация частиц от описанных выше заметных изменений не претерпевали как в нормальных атмосферных условиях, так и при вариациях давления и содержания окислителя.

Таким образом, в данной работе зарегистрирован практически линейный ход полного времени сгорания воспламеняющихся частиц от их размера. Получено также, что в достаточно широком диапазоне потоков энергии и размеров частиц критический радиус воспламенения обратно пропорционален интенсивности воздействующего излучения.

Поступила в редакцию 7/IV 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Кузиковский, В. А. Погодаев. ФГВ, 1977, 13, 5.
2. В. И. Букатый, И. А. Суторихин. Матер. VI Всесоюз. симпозиума по горению и взрыву. Черноголовка, 1980.
3. В. И. Букатый, А. М. Сагалаков и др. ФГВ, 1979, 15, 6.
4. А. С. Предводителей, Л. Н. Хитрин. Горение углерода. М.: Изд-во АН СССР, 1949.