

ется затухающая волна сжатия. Профили течения, возникающие после индуцирования волны ударниками с различной толщиной и начальной скоростью, изображены на рис. 3.

Авторы глубоко признательны В. Л. Загускину за постоянный интерес, внимание и ценные консультации, без которых настоящая работа не могла бы быть выполнена.

*Поступила в редакцию 18/II 1983*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Загускин. Методы расчета задач механики сплошной среды. Ростов-на-Дону: изд. Ростовского ун-та, 1979.
2. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеев. Теория детонации. М.: Гостехиздат, 1955.
3. А. Н. Дремин, С. Д. Савров, В. С. Трофимов и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
4. Л. В. Альтшулер, В. В. Балалаев, Г. С. Доронин и др. ПМТФ, 1982, 1.

### ЧАСТИЦА КАМЕННОГО УГЛЯ В ИНТЕНСИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПУЧКЕ

*В. А. Погодаев*

*(Томск)*

Интенсивное лазерное излучение, распространяясь в реальной атмосфере, взаимодействует с находящимися в ней частицами аэрозоля. Взаимодействие с отдельными частицами водного аэрозоля (облака, туманы, дожди) достаточно подробно описано в литературе для непрерывного и импульсного режимов генерации. При исследовании прохождения лазерного излучения в запыленных средах в основном рассматривалось воздействие импульсного лазерного излучения на некоторые объемы полидисперсного твердого аэрозоля в лабораторных условиях. Изучалось изменение интегральных характеристик лазерного пучка в результате взаимодействия. Подробную библиографию по данному вопросу можно найти в [1]. Работы, посвященные распространению излучения на натурных трассах, исчисляются единицами (см., например, [2]) и содержат исследования пробойных явлений.

Экспериментально слабо изучены процессы воздействия интенсивного лазерного излучения на отдельные частицы твердого аэрозоля различного химического состава. Впервые этот вопрос поднят в работе [3] и в дальнейшем частично развит в [4, 5].

Остановимся на рассмотрении воздействия непрерывного излучения СО<sub>2</sub>-лазера на отдельные частицы угля. В [4] показано, что излучение выполняет роль своеобразного катализатора возникновения термохимической реакции — горения угольных частиц ( $2C + O_2 = 2CO$ ). Малые частицы ( $\sim 10^{-6}$  м) горят только в присутствии излучения, крупные могут гореть и после прекращения облучения. В работе [6] впервые применяется теоретический подход к описанию процесса взаимодействия интенсивного лазерного излучения с отдельными микроскопическими частицами углерода. Показано, что при температуре, развивающейся в процессе термохимической реакции ( $T \leq 4000$  К), величина отношения потоков испаренного и сгораемого вещества частицы (С и СО соответственно) много больше единицы.

Цель данной работы — получение первичных количественных данных о временах взаимодействия излучения с частицами каменноугольной пыли. Характеристики подобных процессов являются исходной информацией при исследовании распространения лазерных пучков в запыленных средах и необходимы для правильной интерпретации результатов дистанционного зондирования атмосферы мощным лазерным излучением. Эксперименты выполнены на установке, блок-схема которой приведена

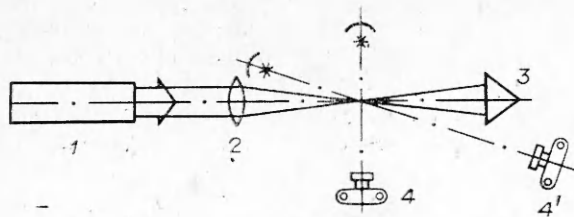


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

на рис. 1. Излучение непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера 1 фокусировалось линзой 2 на частицу, помещенную на серебряную подложку. Принимались специальные меры для исключения взаимодействия лазерного излучения с подложкой. Мощность излучения контролировалась прибором ИМО-2 3. Система скоростная кинокамера — осветитель 4 при необходимости перестраивалась под различными углами.

Ранее [3] замечен пульсирующий характер свечения твердых частиц под действием излучения непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера, обусловленный питанием генератора. На начальной стадии процесса наблюдалась некоторая аритмичность пульсаций, которую нельзя объяснить особенностями лазерной установки.

Эксперименты показали, что качественный ход зависимости температуры горячей частицы угля от времени неоднороден. Наблюдался всплеск длительностью в несколько миллисекунд, затем практически полное угасание и дальнейшее повышение температуры горения. Фотометрическая обработка пленок скоростной съемки собственного свечения процесса действительно показала наличие двух максимумов температуры. Типичная зависимость  $T(t)$  для частиц с  $R \approx 8 \cdot 10^{-5}$  м приведена на рис. 2. Величина  $R$  определялась как половина среднеарифметического размера частицы в вертикальном и горизонтальном направлениях плоскости съемки, а также размера, определяемого дополнительным микроскопом, плоскость наблюдения которого ориентирована перпендикулярно плоскости съемки. Разница температур в максимумах не превышает 20%. На рис. 2 не отражено пульсирование температуры поверхности частицы, которое следует за модуляцией лазерного излучения, вызванной питанием генератора. На наш взгляд, первый максимум обеспечивается выходом летучих.

Главной особенностью частиц каменного угля является наличие в них трех резко различных составляющих: летучей части, кокса и золы. Каждая из этих частей совершенно по-разному участвует в процессе воспламенения и горения. Летучие — это часть, газифицируемая при нагреве без участия окислителя. Кокс, по составу приближающийся к углероду, горит гораздо медленнее, чем выделяются и горят летучие. Минеральная часть состава частиц (зола) — негорючая часть. Наличие второго максимума (см. рис. 2) обуславливается горением кокса и термическим свечением золы.

При нагреве частиц каменного угля лазерным излучением первоначально воспламеняется освещенная часть. В ней инициаторами горения являются микровыступы. Чем меньшее основание имеет микровыступ, тем раньше происходит воспламенение в данной точке поверхности частицы. Полные времена горения подобных неоднородностей чрезвычайно малы и составляют  $\sim 10^{-4}$  с. На рис. 3 приведена часть кинограммы процесса, отснятой по схеме светлого поля. Для четкого выделения очагов горения специально подбиралось ослабление осветителя. Скорость съемки составляла  $10^3$  кадр/с. Направление распространения излучения показано стрелкой. Здесь же приведен пространственный масштаб съемки. Цифры слева обозначают время, прошедшее с момента подачи излучения на частицу. На последующих кадрах кинограммы горение показанных микровыступов отсутствует. Происходит выгорание освещенной части объема частицы и перемещение всплеска горения микровыступов в теневую часть по мере прямого доступа к ним лазерного излучения. Процессы горения неоднородностей и летучих протекают одновременно

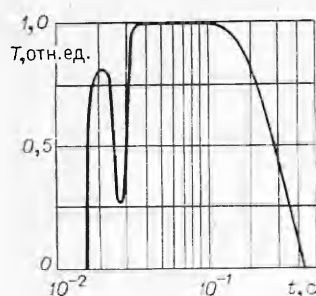
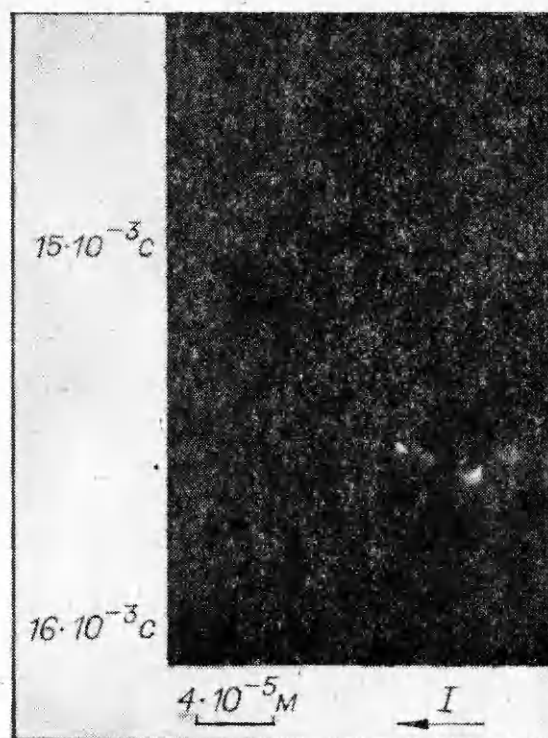


Рис. 2. Временной ход температуры частицы каменного угля при взаимодействии с непрерывным излучением  $\text{CO}_2$ -лазера; интенсивность излучения  $I = 2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

Рис. 3. Кинограмма процесса поджигания частицы каменного угля непрерывным излучением  $\text{CO}_2$ -лазера.



и разделение их долевого вклада в величину первого максимума на данном этапе исследований невозможно.

Времена сгорания углеродных частиц зависят от режима горения, который обусловлен скоростью подвода окислителя (кислорода) к поверхности частицы. Для свободно взвешенных углеродных частиц скорость подвода окислителя определяется скоростью их движения в среде. В [6] рассмотрена скорость движения частицы с переменной массой под действием силы светового давления с учетом силы сопротивления среды по Стоксу. Максимально возможная скорость движения частицы в этом случае не превышает 1 м/с. Это соответствует реальности для частиц радиусом  $\sim 10^{-6}$  м, поскольку коэффициент поглощения углерода  $\sim 10^6$  м<sup>-1</sup>, следовательно, поглощение по объему частицы и ее температуру можно считать равномерными. В этом случае отсутствует реактивная составляющая скорости движения. Нами показано, что увеличение размера частиц до  $10^{-5}$  м уверенно обеспечивает односторонний разогрев вещества и появление реактивной тяги. Для непрерывного излучения ( $\lambda = 10,6 \cdot 10^{-6}$  м) частички указанного размера снимались с плоских подложек со скоростями 5–6 м/с. Отметим, что в случае импульсного воздействия свободные частицы сажи [5] набирали скорость движения до 10 м/с.

Известно, что составы углей, используемых при сжигании в промышленных установках, имеют достаточно широкий диапазон изменения величины теплоты сгорания. В отдельных случаях массовое содержание золы в них может достигать 65%. Использование какого-либо сорта угля в определенном промышленном районе влечет за собой соответствующее запыление окружающего воздушного бассейна.

Взаимодействие интенсивного лазерного излучения с запыленной атмосферой приводит к воспламенению аэрозольных включений. С точки зрения переноса излучения существенны времена воспламенения  $t_a$  и выгорания  $t_r$  частиц, температура горения. Различия в свойствах топлив должно влиять на указанные параметры, температуру пламени и степень его черноты. Наиболее неблагоприятно влияние золы, характерное для углей с большим ее содержанием (длительное термическое свечение) или углей, которые горят с образованием мелкодисперсной зольной фракции. Вклад несгоревшего кокса важен на начальной стадии горения  $\sim (5-7) \cdot 10^{-2}$  с.

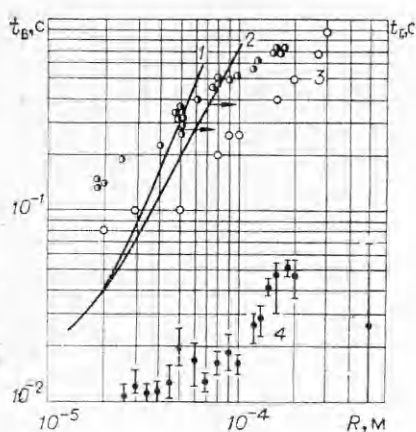


Рис. 4. Времена воспламенения и выгорания частиц каменного угля в зависимости от размера.

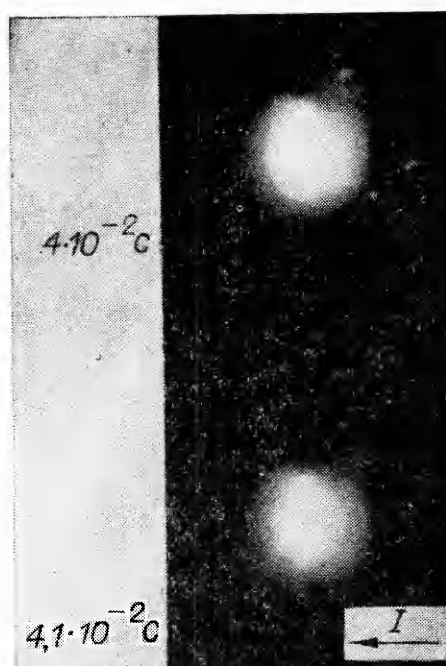


Рис. 5. Кинограмма разрушения частицы каменного угля.

На рис. 4 приведены времена воспламенения и выгорания частиц каменного угля в зависимости от размера. Интенсивность воздействующего излучения поддерживалась в пределах  $2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Точки 3 на рис. 4 соответствуют результатам [7] при температуре окружающей среды 1600 К. Наглядно иллюстрируется преимущество лазерного поджига (точки 4). Спillage времени воспламенения крупных частиц ( $R \approx 5 \cdot 10^{-4}$  м) обязано наличию значительных неоднородностей поверхности. Воспламенение частицы каменного угля, инициируемое лазерным излучением на микровыступах, стимулирует развитие термохимических реакций горения вокруг микровыступов, быстро распространяясь на всю освещенную полусферу частицы. Для проверки этого факта отбирались частицы угля, имеющие минимальное количество неоднородностей поверхности. Времена их воспламенения возрастали в 2—3 раза. Для сильно изрезанных поверхностей микровыступы являются очагами начала фрагментации частиц.

На рис. 4 кривая 2 построена по [7] для диффузионного режима горения частиц каменного угля при температуре окружающей среды 1200 К. Кривая 1 отображает результаты [6] для времени выгорания частиц сажи под действием лазерного излучения. Данные нашего эксперимента по временам выгорания частиц сажи в лазерных пучках несколько ниже, чем для частиц угля, и здесь не приводятся. Для примера отметим, что время полного выгорания частицы сажи  $R \sim 1,5 \cdot 10^{-4}$  м составляет  $4,5 \cdot 10^{-1}$  с, в то время как частицы угля того же размера выгорают за  $(6 \div 7) \cdot 10^{-1}$  с.

Таким образом, в промышленных угольных районах следует различать два вида взаимодействия лазерного излучения с частицами. Первый — взаимодействие излучения непосредственно с частицами угля со следующими этапами: разогрев, выход и горение летучих, воспламенение и горение кокса, образование зольного остатка, его плавление, испарение, фрагментация. Длительность и характер протекания каждого этапа существенно зависит от сорта угля и интенсивности воздействующего излучения. В экспериментах наблюдалось дробление частицы каменного угля на фрагменты. Оптическая активность частицы в этом случае проявляется достаточно быстро (момент воспламенения) и поддерживается как поглощением падающего излучения, так и за счет термоди-

мической реакции. Фрагментация и последующий разлет вторичных частиц иллюстрируются рис. 5. Снималось собственное свечение частицы. Скорость съемки  $10^3$  кадр/с. Стрелкой показано направление воздействия лазерного излучения. Определение размеров фрагментированных частиц не проводилось в связи с большой разницей истинного размера частицы, снятого до воздействия, и размера светящегося образования. Этот вопрос требует специально поставленной методической проработки и выходит за рамки данной статьи.

Рассмотрим взаимодействие излучения с частицами зольного остатка. За время нахождения частицы в лазерном пучке можно выделить также несколько этапов взаимодействия: нагрев частицы до температуры плавления, плавление и нагрев частицы до температуры кипения, испарение частицы, фрагментация. Последний этап для частиц золи  $\sim (2 \div 3) \cdot 10^{-5}$  м, помещенных на подложке, наблюдался при  $I \sim \sim 2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Перенос указанного результата на свободные частицы затруднен влиянием подложки и для решения этого вопроса необходимы специально поставленные эксперименты. Изменения размеров частицы за счет испарения в экспериментах не обнаружено и этим этапом можно пренебречь. Наибольшая оптическая активность наблюдается на первом этапе за счет изменения формы частицы и возникновения теплового ореола, что ведет к увеличению интенсивности прошедшего излучения, рассеянного в малых углах. Экспериментально указанный эффект наблюдался при перемещении системы камера — осветитель в положение 4 (см. рис. 1).

В квазистационарном приближении, когда температура частицы и среды не меняется, радиус ореола можно приближенно оценить по формуле  $R \sim \sqrt{T_0/T_1} \cdot R_0$ , где  $R_0$  — радиус частицы;  $T_0$ ,  $T_1$  — температура среды и частицы соответственно. На втором этапе частица нагревается от температуры плавления до температуры кипения, что приводит к уменьшению размеров ореола. Следовательно, уменьшается рассеяние света под малыми углами, однако и в этом случае ослабление излучения остается меньшим, чем ослабление только на одних частицах.

На четвертом этапе наблюдается модуляция интенсивности излучения, прошедшего область взаимодействия, за счет изменения концентрации частиц в среде при фрагментации.

*Поступила в редакцию 23/IX 1982*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Зуев, А. В. Кузиковский, Ю. Д. Копытин. Нелинейные оптические эффекты в аэрозолях. Новосибирск: Наука, 1980.
2. А. П. Годлевский, Ю. Д. Копытин. ЖПС, 1979, 31, 4, 612.
3. В. А. Погодаев. Тез. докл. II Всесоюз. симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 1973.
4. А. В. Кузиковский, В. А. Погодаев. ФГВ, 1977, 13, 5, 783.
5. В. П. Букатый, В. А. Погодаев, Д. П. Чапоров. ПМТФ, 1979, 1, 30.
6. В. И. Букатый, А. М. Сагалаков, А. А. Тельнихин и др. ФГВ, 1979, 15, 6, 46.
7. В. И. Бабий, И. Ф. Попова. ИФЖ, 1971, 21, 3, 411.

### ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В СИСТЕМАХ С ДВУМЯ КОНКУРИРУЮЩИМИ ЭКЗО- И ЭНДОТЕРМИЧЕСКИМИ РЕАКЦИЯМИ. I. ТЕПЛОВОЙ ВЗРЫВ

*М. Б. Боровиков, У. И. Гольдшлегер, И. А. Буровой  
(Москва)*

В [1—3] исследовались закономерности превращения в химически реагирующей системе при протекании нескольких экзотермических реакций. Однако в реальных процессах возможны случаи, когда некоторые