

03;07;12

©1994

ОПТИЧЕСКАЯ ДЕФЛАГРАЦИЯ В ПАРАХ ВОДЫ, ПОДДЕРЖИВАЕМАЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ CO₂ ЛАЗЕРА

Г.И.Козлов, В.А.Кузнецов

Под воздействием сфокусированного лазерного излучения в жидкостях могут возникать воронки [1]. В процессе дальнейших исследований взаимодействия излучения CO₂ лазера с водой был обнаружен новый эффект: при некоторой мощности луча в парах воды возникает оптическая дефлаграция, т. е. образование термохимического факела.

В экспериментах использовался непрерывный газоразрядный CO₂ лазер с диффузионным охлаждением мощностью 7 кВт. Лазерный луч с помощью линзы фокусировался над поверхностью жидкости внутри кварцевой трубы диаметром 60 мм, установленной вертикально, и примерно наполовину заполненной водой.

В начальный момент воздействия луча на поверхность воды наблюдалось бурное вскипание поверхностного слоя, сопровождающееся интенсивным испарением. Испарение приводило к формированию внутри трубы потока водяных паров со скоростями порядка 1–2 м/с. При некоторых условиях в этом потоке, находящемся под воздействием сфокусированного лазерного излучения, наблюдались эффекты воспламенения и стационарной оптической дефлаграции. Причем характер взаимодействия при заданной мощности луча определялся положением фокуса над поверхностью воды. При небольших (5–10 см) расстояниях фокуса над поверхностью воды наблюдалось образование пунктира из микровспышек, возникающих вдоль оси лазерного луча в области фокальной перетяжки. Лазерный пробой в парах воды, вероятно, инициируется присутствующими в них сильнопоглощающими микровключениями. В наших экспериментах микропробой могут “поджигать” световую дефлаграцию.

При увеличении расстояния между фокусом и поверхностью воды до ≈ 15 см в верхней части фокальной перетяжки происходит вспышка и образование очага оптической дефлаграции. На рис. 1, а представлена фотография таких очагов, последовательно образующихся вблизи фокуса и распространяющихся вверх по трубе. Фактически реализуется периодический режим процесса горения световой

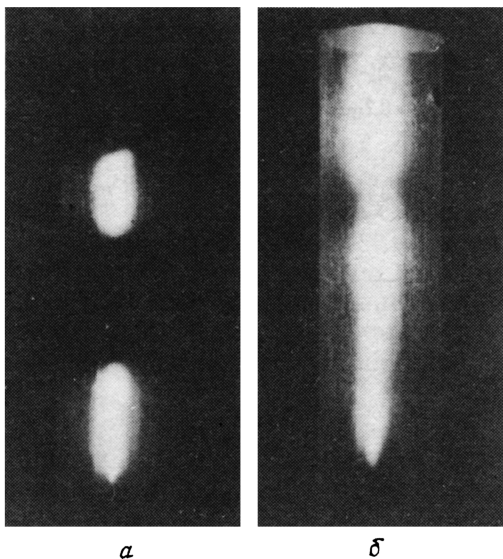


Рис. 1.

дефлаграции, причем частота вспышек возрастает по мере подъема фокальной перетяжки над поверхностью воды.

И наконец, когда расстояние от фокуса до поверхности воды возрастает до 25–30 см, периодический процесс горения вырождается в стационарный факел, размер которого в наших экспериментах составлял примерно 20–25 см. Фотография факела представлена на рис. 1, б. Важно подчеркнуть характерную особенность процесса, заключающуюся в том, что процесс горения практически локализован только в пределах светового конуса. Причем видно, что отсутствует фронт пламени, а горение носит объемный характер. Это наводит на мысль, что факел дефлаграционного горения представляет собой реализацию равновесного процесса, в ходе которого под действием лазерного излучения происходит разогрев паров воды и их диссоциация.

Диссоциация паров воды в лазерном луче была доказана хроматографическим анализом проб, отбираемых из кюветы. При этом оказалось, что в пробах, взятых на выходе из кюветы вне пределов дефлаграционного факела, концентрация водорода достигала нескольких процентов.

Природа пламени световой дефлаграции, очевидно, связана с разогревом паров воды за счет лазерного энергозклада в колебательные степени свободы молекул воды. Молекулы воды в основном состоянии слабо поглощают излучение CO_2 лазера, но при увеличении температуры паров коэффициент поглощения χ возрастает. С целью измерения χ

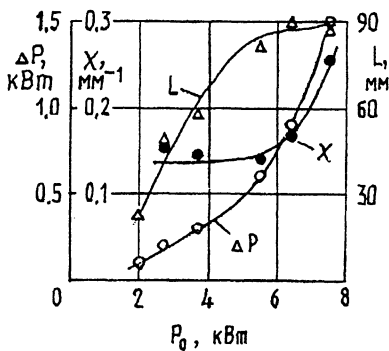


Рис. 2.

дефлаграционного факела мы провели эксперименты с широкой вертикальной струей водяного пара, которая формировалась в специальной кювете. Кювета имела отверстия для прохождения через нее горизонтального лазерного луча.

Оказалось, что при малой мощности луча P порядка 1 кВт в области фокусировки ничего замечено не было. При увеличении мощности в области фокальной перетяжки вспыхивал факел световой дефлаграции, размеры которого вдоль луча быстро возрастали с увеличением мощности, и при ≈ 7 кВт протяженность факела дефлаграции составляла 90 мм.

Результаты этих экспериментов представлены на рис. 2 в виде зависимости от мощного лазерного луча P , длины зоны световой дефлаграции L , поглощенной мощности ΔP и коэффициента поглощения χ . Из графиков следует, что с увеличением мощности луча от 2 до 5 кВт растет длина зоны дефлаграции, при этом χ остается почти постоянным и равным 0.15 мм^{-1} . При дальнейшем увеличении мощности лазерного излучения длина зоны остается практически неизменной, но при этом резко возрастает χ , что может быть связано с увеличением температуры факела и интенсификацией процесса горения водорода. Этот вопрос, однако, требует дальнейшего изучения. Очевидно, наблюдаемая в наших экспериментах зависимость режимов горения световой дефлаграции от положения области фокусировки, связана с постепенным прогревом паров воды в поле лазерного излучения.

Анализ процесса световой дефлаграции требует совместного рассмотрения уравнений энергетического баланса и физико-химической кинетики и в общем случае весьма сложен. В первом приближении можно считать, что в на-

ших экспериментах релаксационные $V-T$ процессы являются доминирующими и поддерживают систему практически в равновесном состоянии. В этом случае значения стационарных концентраций определяет χ и в любом случае равновесная концентрация поглощающих молекул будет определяться бoльцмановским фактором $n_i = n_0 e^{(-E_i/kT)}$. Так что тепловыделение в единице объема смеси равно $\sum \sigma_i n_i \cdot I$ (здесь σ_i — сечение поглощения, а I — интенсивность лазерного излучения). Тогда стационарную температуру системы будет определять следующее уравнение энергетического баланса для цилиндрического объема в предположении, что теплотери определяются теплопроводностью [2]:

$$\chi(T) \cdot P = A \cdot \theta(T); \quad \chi = \sum \sigma_i n_i. \quad (1)$$

Здесь $\theta(T)$ — потенциал потока тепла, A — численный коэффициент, зависящий от радиального профиля T .

У уравнения (1) при одной и той же мощности может быть несколько стационарных решений. Если концентрация поглощающих частиц мала, то мало и тепловыделение, которое выводится из системы теплопроводностью без разогрева смеси. При высоких значениях температуры поглощающих частиц много, и в системе выделяется большая мощность, которая выводится из системы теплопроводностью с большим градиентом температуры.

Возможно также установление в системе периодического режима, при котором зависимость концентрации поглощающих частиц от времени носит циклический характер.

Отметим, что для возникновения пламени световой дефлаграции необходимо, чтобы диссоциация паров воды была заметной, что достигается при температурах порядка 2000 К и выше. Эта температура и определяет пороговое значение мощности лазерного излучения P_i для возникновения дефлаграционного факела. Его можно оценить из уравнения (1), если принять, что коэффициент поглощения, по данным наших измерений, $\chi = 0.15 \text{ мм}^{-1}$. Тогда, полагая $A = 2$ для $\theta(2000 \text{ К}) = 2.4 \text{ Вт/см}$ из уравнения (1), находим $P_i \approx 1 \text{ кВт}$, что неплохо коррелирует с приведенными выше экспериментальными данными.

Список литературы

- [1] Антонов А.А., Козлов Г.И., Кузнецов В.А., Масюков В.А. // Квантовая электроника. 1977. Т. 4. В. 8. С. 1747-1753.
- [2] Козлов Г.И., Кузнецов В.А. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. В. 17. С. 1063-1067.

Институт проблем
механики
Москва

Поступило в Редакцию
14 апреля 1994 г.
В окончательной редакции
6 октября 1994 г.
