

03;07;12

## **Некоторые закономерности воспламенения лазерным лучом потока этилена в воздухе**

© Г.И. Козлов

Институт проблем механики РАН, Москва

*Поступило в Редакцию 13 января 1997 г.*

Экспериментально исследовался процесс воспламенения потока этилена в воздухе под воздействием лазерного луча. Установлены двухстадийный характер процесса воспламенения и чрезвычайно низкое пороговое значение мощности поджигающего лазерного излучения.

Одним из перспективных направлений исследований является изучение воздействия лазерного излучения на процессы воспламенения и горения горючих газовых смесей. Уже сегодня практический интерес проявляется к вопросам инициирования процессов горения и взрыва, безопасности использования лазерного скальпеля, применения лазерного излучения для создания альтернативных систем зажигания, синтеза различных материалов и т. д.

В настоящей работе предпринята попытка экспериментально изучить особенности развития процесса воспламенения потока этилена в атмосферном воздухе под воздействием лазерного луча. Этому вопросу, в силу его практической значимости, в последнее время был посвящен ряд работ [1–3], однако они не затрагивали принципиальных вопросов, связанных с изучением механизма воспламенения в лазерном луче.

Эксперименты проводились на горелке плоского пламени диаметром 6 см с использованием газоразрядного непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера мощностью 35 W [2]. Через горелку подавался этилен, поток которого вытекал в атмосферу и на выходе из горелки пересекал область фокусировки лазерного луча. Луч CO<sub>2</sub>-лазера фокусировался линзой из соли KCl с фокусным расстоянием 7.5 см в пятно диаметром примерно 0.4 mm. Область фокусировки смещением линзы могла перемещаться вдоль диаметра горелки и локализоваться в различных точках потока на расстоянии примерно 1.5 см над выходным сечением горелки.

Развитие процесса воспламенения регистрировалось видеокамерой. Анализ видеок кадров позволил сделать ряд важных заключений о развитии процесса воспламенения лазерным лучом потока этилена в воздухе.

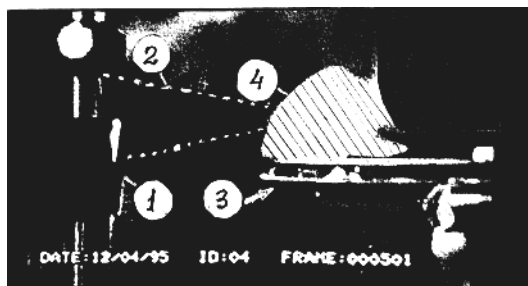
В первой серии экспериментов область фокусировки располагалась на расстоянии примерно 1.0 см от края горелки в зоне перемешивания потока этилена с окружающим воздухом. Было установлено, что при превышении некоторого порогового значения мощности лазерного луча воспламенение горючей смеси происходило стабильно после истечения периода индукции. Для этих условий пороговое значение мощности  $P_t$  для инициирования процесса воспламенения оказалось неожиданно низким и равным всего 11.5 W. Но этому значению мощности соответствует достаточно высокое пороговое значение интенсивности лазерного излучения в фокусе, равное  $S_t \approx 10^4$  W/cm<sup>2</sup>.

Оказалось, что при смещении фокуса к центру горелки внутрь потока этилена воспламенение происходило уже не в фокусе, а в сходящейся части светового конуса, т. е. в том месте, где состав горючей смеси был оптимальным для инициирования процесса воспламенения. В экспериментах, когда область фокусировки сдвигалась глубоко в поток этилена, воспламенение происходило всего в 2.5 см от поверхности линзы. Это было удивительно, так как в этом месте интенсивность лазерного излучения была чрезвычайно низкой и не превышала значения  $S_t \approx 40$  W/cm<sup>2</sup>! Таким образом, для больших сечений лазерного луча пороговое для воспламенения значение интенсивности лазерного излучения резко (на два-три порядка!) снижается.

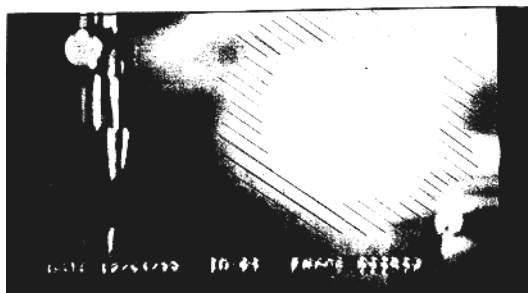
Объяснить столь сильную зависимость  $S_t$  от диаметра луча  $2r_0$  можно следующим образом. Представим себе, что область воспламенения имеет вид шара с радиусом  $r_0$ . Тогда энерговыделение внутри этого шара будет равно приблизительно  $P_t \kappa 2r_0$  (где  $\kappa$  — коэффициент поглощения лазерного излучения горючей смесью). В предположении, что энергопотери являются теплопроводностными, их величина для шаровидной области воспламенения составляет  $4\pi\theta r_0$  (здесь  $\theta$  — потенциал потока тепла для горючей смеси). Приравнявая энерговыделение теплотерям, находим, что величина  $S_t$  связана с радиусом  $r_0$  следующим выражением:

$$S_t \approx \frac{2\theta}{\kappa r_0^2},$$

которое в первом приближении неплохо коррелирует с экспериментом.



а



б

Видеокадры развития процесса воспламенения потока этилена лазерным лучом: 1 — линза; 2 — контуры сфокусированного лазерного луча; 3 — выходное сечение горелки; 4 — область воспламенения (косая штриховка — голубая зона, незаштрихованная область в центре — оранжевая зона).

Другая особенность, которая следует из анализа проведенных экспериментов, связана с развитием процесса воспламенения. На рисунке приведены два наиболее характерных видеокадра развития процесса для случая, когда фокус находился на расстоянии 1.0 см от края горелки. Из анализа видеокадров следует, что в этом случае процесс воспламенения инициируется в области фокусировки лазерного луча. При этом на первой стадии развития процесса (см. рисунок, а) в фокусе образуется зародыш-очаг с голубым свечением, фронт которого быстро распространяется во всех направлениях со скоростью, превышающей скорость распространения холодных пламен и максимальное значение

скорости распространения пламени в этиленовоздушных смесях. Скорость расширения границы голубой зоны составляет примерно 1 м/с и, вероятно, определяется диффузией активных частиц-атомов водорода.

На второй стадии развития процесса воспламенения, как это видно из следующего кадра, сделанного через 40 мс и представленного на рисунке, *b*, в пределах голубой зоны происходит яркая, взрывного характера вспышка оранжево-желтого цвета, фронт которой распространяется через всю область образовавшейся горючей смеси.

Такая картина развития процесса воспламенения в лазерном луче указывает на сложный термокинетический механизм. В самом деле, если бы лазерный луч действовал только как тепловой источник, то мы должны были бы наблюдать вблизи фокуса образование фронта пламени и его последующее распространение на весь объем горючей смеси. Однако детали видеозаписи развития процесса воспламенения указывают на принципиально иной, двухстадийный и взрывной характер воспламенения. На первой стадии воспламенения нагрев газа за время пребывания в лазерном луче невелик и, как показывают оценки, не превышает примерно 300°С. При этих условиях в смеси идут окислительные процессы типа холодно-пламенных, связанных с преобразованием горючей смеси и выработкой промежуточных продуктов типа альдегидов и пероксидов.

На второй стадии процесса происходит, вероятно, разложение этих веществ с образованием большого количества активных атомов и радикалов. Эти активные частицы инициируют в пределах голубой зоны цепной разветвленный химический процесс, приводящий к прогрессивному ускорению хода химических превращений и образованию ряда устойчивых промежуточных продуктов, в том числе и ацетилена. Яркая оранжевая вспышка на этой стадии развития процесса воспламенения обусловлена, вероятно, реакцией разложения ацетилена. Вспышка носит объемный характер и сопровождается значительным энерговыделением, расширением продуктов реакции в очаге воспламенения и турбулизацией всего потока.

В дальнейшем область воспламенения трансформируется в факел диффузионного пламени, который полностью блокирует проникновение кислорода воздуха в зону лазерного луча, где произошло воспламенение. После этого характер воздействия лазерного излучения на поток этилена становится совершенно другим, но об этом в последующих публикациях.

Таким образом, полученные материалы свидетельствуют о большой специфике механизма воспламенения потока этилена в воздухе лазерным лучом, низких пороговых значениях мощности луча, а также двухстадийном взрывном характере процесса воспламенения, что требует дальнейшего более углубленного изучения.

В заключение автор выражает глубокую благодарность Королевскому Обществу Великобритании за присуждение гранта, позволившего выполнить эти исследования в Империял Колледже Лондонского университета в содружестве с проф. Ф. Вайнбергом и докторами Ф. Карлтоном и М. Карабайном.

## Список литературы

- [1] *Козлов Г.И., Кузнецов В.А., Сокуренок А.Д.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 11. С. 25–29.
- [2] *Carabine M.D., Carleton F.B., Kozlov G.I., Weinberg F.J.* // Joint meeting of the Portuguese, British, Spanish and Swedish Section of the Combustion Institute. Madeira, 1996. P. 21.7.1–4.
- [3] *Tanoff M.A., Smooke M.D., Teets R.E., Sell J.A.* // Combustion and Flame. 1995. V. 103. P. 253–280.