

03

© 1991

О МЕХАНИЗМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВЗРЫВНОГО ГОРЕНИЯ ПРОПАНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В СФОКУСИРОВАННОМ ЛУЧЕ МОЩНОГО CO_2 -ЛАЗЕРАГ.И. К о з л о в, В.А. К у з н е ц о в,
А.Д. С о к у р е н к о

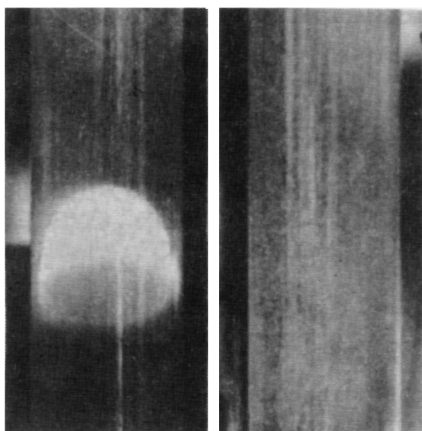
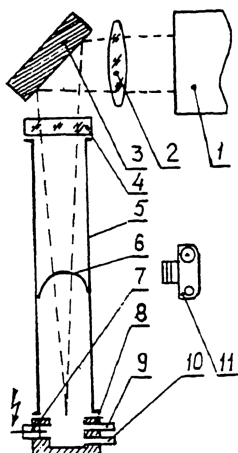
Воздействие лазерного излучения на горючие смеси позволяют осуществить управление процессами горения [1], взрыва и детонации. Под действием мощного лазерного излучения в поглощающих его химически активных средах может происходить диссоциация исходных молекул и образование активных атомов и радикалов, значительно ускоряющих протекание химического процесса. В ряде случаев такое воздействие может приводить к разложению исходных и образованию полезных веществ, а в других к разрушению и уничтожению вредных и агрессивных веществ.

В настоящей работе впервые сообщается о возбуждении взрывного режима горения пропано-воздушных смесей в сфокусированном лазерном луче.

Эксперименты проводились в кварцевой трубе, наполненной исследуемой смесью (рис. 1). Излучение непрерывного CO_2 -лазера через окно, прозрачное для лазерного излучения, входило в трубу через один торец и фокусировалось у противоположного глухого торца трубы. Глухой торец трубы представляет собой клапан, который срабатывал при увеличении давления в трубе выше атмосферного. Кроме того, в клапане имелись отверстия для вакуумирования трубы и наполнения ее исследуемой смесью, а также автомобильная свеча для ее поджигания.

После заполнения трубы горючей смесью инициировался поджиг с помощью свечи и измерялась скорость распространения фронта пламени по трубе (рис. 2). Определялся такой состав пропано-воздушной смеси, для которой скорость распространения пламени была небольшой, так что фронт пламени легко можно было наблюдать визуально. Этому требованию отвечает 3 %-я смесь пропана с воздухом, скорость распространения пламени в которой составляла примерно 0.7 м/с.

Затем эксперимент был изменен, и после прохождения пламенем начального нестационарного участка его формирования открывался затвор резонатора лазера и в трубу вводился лазерный луч мощностью 10 кВт. При этом мы надеялись зарегистрировать ускорение фронта пламени или возможное искривление его поверхности, так как лазерный луч перекрывал только часть сечения трубы. Однако



а

б

Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 - лазер, 2 - фокусирующая линза, 3 - поворотное зеркало, 4 - входное окно, 5 - кварцевая труба, 6 - пламя, 7 - поджигающая свеча, 8 - нижний фланец-клапан, 9 - подвод горючей смеси, 10 - штуцер откачки, 11 - фото(кино)аппарат.

Рис. 2. Фотографии процессов, происходящих в горючей смеси: а - без лазерного луча, б - с лучом.

вместо этого был зафиксирован взрывной процесс, который протекал настолько быстро, что зарегистрировать распространение фронта горения на кино- и фотоаппаратуре не удалось. Интересно, что когда свечу отключили, то все равно при включении лазерного излучения в трубе происходил взрыв. Таким образом, взрывной процесс горения инициировался лазерным лучом. Непонятно, однако, почему всё-таки искра инициировала дефлаграционный процесс распространения пламени по трубе, а лазерный луч - взрывное горение.

Вначале объяснение виделось в том, что в экспериментах в сфокусированном лазерном луче, по всей вероятности, за счет поглощения лазерного излучения происходил неоднородный по длине канала разогрев горючей пропано-воздушной смеси. Это автоматически приводило к ситуации, когда воспламенение смеси происходило сначала в области фокусировки луча, а затем вдоль расходящегося лазерного луча в соответствии с пространственным распределением периода индукции воспламенения по длине канала. Из численных исследований [2, 3] известно, что в принципе начальная неоднородность температурного поля может явиться причиной взрывных явлений, сопровождающихся образованием интенсивных волн давления.

Вопрос, однако, заключался в том: возможно ли это было в условиях нашего эксперимента? С этой целью нами было проведено численное исследование, по постановке полностью адекватное описанному выше эксперименту. Задача сводилась к решению системы одномерных нестационарных уравнений газовой динамики с учетом энерговыделения за счет поглощения лазерного излучения и протекания химического процесса. Для случая прозрачной для лазерного излучения реакционноспособной среды эта система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + \gamma p \frac{\partial u}{\partial x} &= (\gamma - 1) q \varphi + (\gamma - 1) \beta N_T I_0 \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha}{\partial x} &= -\varphi / \rho. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь, кроме общепринятых обозначений, γ — показатель адиабаты, q и φ — соответственно тепловой эффект и скорость реакции горения, β — сечение поглощения лазерного излучения, N_T — число молекул топлива в единице объема, α — относительная весовая концентрация топлива, $I_0 = I_{0m}(1 + cx)^{-2}$ — интенсивность лазерного излучения, I_{0m} — максимальное значение интенсивности в перетяжке каустики, c — константа, определяющая угол схождения излучения. Система уравнений (1) решалась при следующих, соответствующих эксперименту, начальных и граничных условиях:

$$\rho(0, x) = \rho_0; \alpha(0, x) = \alpha_0; u(0, x) = 0 \text{ и } u(t, 0) = 0. \quad (2)$$

В системе уравнений (1) мы пренебрегли диссипативными членами, так как нас интересуют достаточно быстрые процессы.

В качестве источника φ использовалось суммарное кинетическое уравнение горения пропано-воздушных смесей, определенное в работе [4]. Система нестационарных уравнений газовой динамики, записанная в лагранжевых переменных, решалась методом Ньютона по полностью консервативной неявной схеме с введением искусственной вязкости.

Результаты численного решения системы (1) для условий проведения наших экспериментов свидетельствуют о том, что процесс горения, начавшийся в окрестности $x=0$, в отсутствие теплопроводности быстро затухает, при этом слабые волны сжатия, генерированные в этой области, осуществляют быстрый отток газа из зоны реакции. Анализ возможных причин расхождения результатов

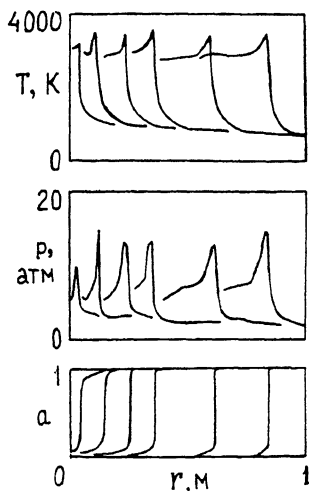


Рис. 3. Расчетные профили температуры (T), давления (p) и относительной весовой концентрации топлива (a) в моменты времени: 2.24, 2.30, 2.38, 2.43, 2.58, 2.70 (мс).

расчета с экспериментом позволил заключить, что она может быть обусловлена неучетом увеличения коэффициента поглощения среды за счет разогрева газа.

Однако ни увеличение коэффициента поглощения на порядок, ни уменьшение значения коэффициента s на порядок, что должно было бы создать более благоприятные условия для развития процесса, не привели к формированию сколь-

ко-нибудь интенсивных скачков давления.

Эти результаты свидетельствуют о том, что представленная численная модель не адекватна нашему эксперименту. Анализ показал, что причина расхождения связана, вероятно, с тем, что под действием лазерного излучения происходит существенное изменение состава исходной пропано-воздушной смеси. В реакционной смеси образуются активные атомы и радикалы, что вызывает значительное увеличение скорости реакции.

В настоящее время мы не располагаем детальными знаниями механизма и кинетики этого процесса и не имеем соответствующих кинетических уравнений. Учитывая это обстоятельство и преследуя цель нахождения ответа на принципиальный вопрос о возможности генерирования сильных ударных волн путем инициирования процесса горения в поле неоднородного лазерного излучения, мы увеличили значение константы скорости реакции на два порядка, что примерно соответствует значениям, характерным для реакций с участием активных частиц. На рис. 3 представлены результаты расчета профилей давления, температуры и относительной весовой концентрации топлива в различные моменты времени. Из рассмотрения этих данных следует, что в этом случае действительно газодинамические процессы быстро формируют детонационную волну.

Таким образом, возникновение взрывного режима горения пропано-воздушных смесей в поле сфокусированного лазерного излучения связано, во-первых, с диссоциацией молекул пропана в лазерном луче и, во-вторых, с формированием в поле неоднородного лазерного излучения неоднородных по длине канала температурных и концентрационных полей, что в результате неравномерного протекания реакции приводит к развитию газодинамических процессов с образованием ударных и детонационных волн.

Отмеченные выше закономерности носят общий характер. В связи с этим более полное решение задачи о взрывных режимах

горения горючих смесей в поле лазерного излучения будет опубликовано в ЖТФ.

Авторы выражают благодарность С.В. Захарову за проведение численных расчетов и полезные обсуждения.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Козлов Г.И., Кузнецов В.А., Сокуренок А.Д. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 9. С. 55-59.
- [2] Зельдович Я.Б., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М., Сивашинский Г.И. // ПМТФ. 1970. № 2. С. 76-89.
- [3] Махвиладзе Г.М., Рогатых Д.Н. Препринт ИПМ АН СССР, 1988. № 321. 40 с.
- [4] Борисов А.Б., Заманский В.М., Лисянский В.В. и др. // Химическая физика. 1988. Т. 7. № 5. С. 665-673.

Институт проблем
механики АН СССР,
Москва

Поступило в Редакцию
22 апреля 1991 г.