

03:07:12

Исследование закономерностей распространения волн пиролиза и горения по лазерному лучу в пропане

© Г.И. Козлов

Институт проблем механики РАН, Москва

Поступило в Редакцию 21 октября 1997 г.

Экспериментально показано, что предварительное преобразование горючей смеси может приводить к значительному ускорению реакции горения.

Стремление к перманентной интенсификации процессов горения, с одной стороны, и относительно низкая реакционная способность природных углеводородных горючих (метана, пропана и др.) — с другой, приводят, как правило, к тому, что в современных камерах сгорания процесс горения полностью не завершается. В результате в атмосферу выбрасывается много продуктов неполного горения — вредных примесей, в том числе и окиси углерода.

Одним из перспективных решений этой проблемы может оказаться переход на новые принципы сжигания углеводородных горючих, основанные на предварительном преобразовании горючей смеси с целью увеличения ее реакционной способности. На первой стадии исследований важно было продемонстрировать в принципе возможность такого подхода к решению проблемы. Поэтому в настоящей работе, в которой приводятся результаты первых поисковых экспериментов по изучению скоростей распространения волн пиролиза и горения по лазерному лучу, мы попытались показать на примере пропана, что предварительное преобразование горючей смеси может приводить к значительному ускорению реакций горения.

Эксперименты проводились на установке, созданной на базе непрерывного газоразрядного CO₂-лазера с диффузионным охлаждением мощностью 5 kW [1]. Лазерный луч с расходимостью примерно $3 \cdot 10^{-3}$ rad фокусировался линзой из хлористого калия с фокусным расстоянием 110 см и проходил через соляное входное окно внутрь кварцевой реакционной трубы с внутренним диаметром 7.1 см и длиной

51 см, которая располагалась горизонтально, так что лазерный луч проходил вдоль оси трубы. При этом диаметр луча на входном окне составлял 3.4 см, а диаметр пятна фокусировки не превышал 0.6 см. Область фокусировки могла с помощью линзы перемещаться вдоль оси трубы, но в этих экспериментах расстояние фокуса от окна не варьировалось и равнялось 32.0 см. Второй торец камеры был закрыт фланцем, в котором имелись отверстия для вакуумирования трубы и наполнения ее газом.

После заполнения реакционной трубы исследуемой смесью до заданного давления включением магнита открывался затвор лазера и лазерный луч инициировал вспышку световой дефлаграции и последующее распространение фронта волны оптической дефлаграции вдоль луча. Регистрация процесса осуществлялась видеокамерой, что позволило определить закономерности распространения фронта для различных давлений и составов исследуемой смеси газов.

На первом этапе работы было исследовано инициирование волны пиролиза и ее распространение в пропане. На рис. 1 представлены фотографии волны пиролиза, распространяющейся по лазерному лучу при давлении пропана 25 Torr для разных моментов времени. Из анализа снимков следует, что инициирование процесса, то есть возникновение волны пиролиза, в которой протекает эндотермическая реакция разложения пропана, происходит в фокусе. После "воспламенения" наблюдалось распространение по лучу волн пиролиза в обе стороны от фокуса, что свидетельствует о частичной прозрачности пропана и продуктов его пиролиза для лазерного излучения с длиной волны 10.6 μm . Прежде всего интерес представляла скорость фронта волны, распространяющейся навстречу лучу. Соответствующая обработка видеок кадров позволила построить графики положения фронта в различные моменты времени. Результаты этих измерений приведены на рис. 2, из анализа которых следует, что скорость фронта волны пиролиза при этом давлении пропана слабо зависит от интенсивности лазерного излучения, величина которой снижалась от фокуса до входного окна почти в 30 раз, однако скорость фронта при этом уменьшилась всего примерно вдвое.

При добавлении к пропану 100 Torr гелия скорость фронта заметно уменьшалась, как это следует из графика, приведенного на рис. 2. Это падение скорости несомненно связано с тем обстоятельством, что гелий является фактически балластом и поэтому существенно замедляет как скорость нагрева пропана в лазерном луче, так и скорость реакции разложения молекул пропана. Следует также отметить, что в этом случае

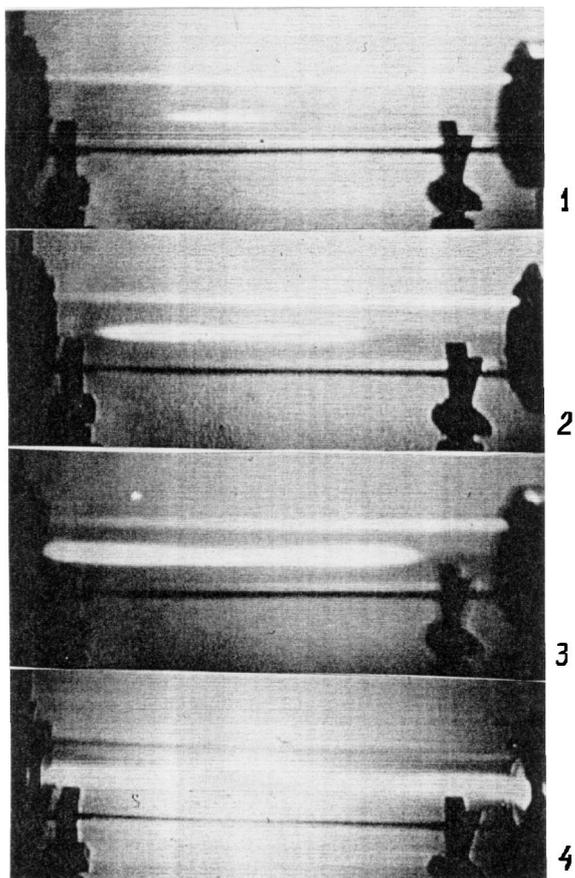


Рис. 1. Фотографии видеок кадров процесса распространения фронта волны оптической дефлаграции по лазерному лучу в пропане в различные моменты времени: 1 — 0.08, 2 — 0.24, 3 — 0.64, 4 — 0.80 с.

зависимость скорости фронта от интенсивности более сильная. Если в области фокусировки, где интенсивность равнялась $1.8 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$, значение скорости составляло 46 см/с, то у выходного окна, где интенсивность была всего $5 \cdot 10^2 \text{ W/cm}^2$, скорость не превышала 10 см/с.

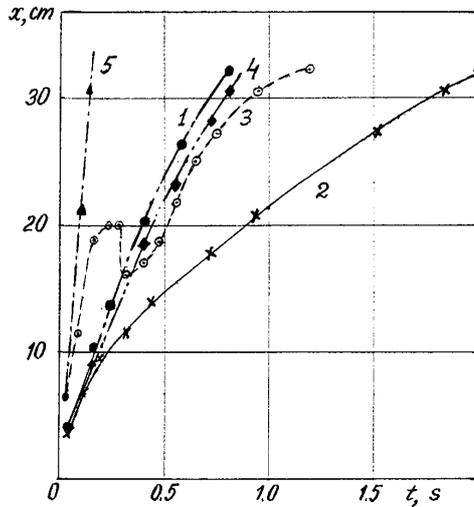


Рис. 2. Зависимости положения фронта волны пиролиза в различные моменты времени: 1 — пропан (25 Torr); 2 — пропан (25 Torr) + гелий (100 Torr); 3 — пропан (100 Torr); 4 — пропан (25 Torr) + воздух (125 Torr); 5 — пропан (25 Torr) + воздух (125 Torr) с предварительным пиролизом пропана.

Наоборот, с увеличением давления пропана от 25 до 100 Torr и выше скорость распространения фронта вблизи области фокусировки заметно возрастала до 1.3 м/с. Однако в дальнейшем наблюдалась любопытная особенность в поведении фронта, связанная с замедлением его распространения, остановкой и даже некоторым отступлением назад к фокусу. Но через несколько кадров происходило как бы восстановление процесса и фронт волны пиролиза продолжал свое движение по лучу. Такая особенность в распространении фронта (см. рис. 2), которая хорошо воспроизводилась, может быть связана с частичной экранировкой процесса промежуточными продуктами пиролиза пропана, которые либо образовывались по трассе луча перед фронтом волны, либо благодаря конвективным потокам оказывались у входного окна намного раньше прихода туда волны пиролиза. На видеокамерах благодаря частицам углерода хорошо был виден конвективный поток, который порождался нагревом газа в лазерном луче. Из зоны луча он поднимался вверх, достигал стенки трубы и растекался во все стороны. При этом

содержавшиеся в конвективном потоке частицы углерода осаждались на холодных стенках камеры.

На второй стадии исследований к 25 Torr пропана было добавлено 125 Torr воздуха, при этом мы надеялись зарегистрировать ускорение распространения фронта по лазерному лучу за счет дополнительного энерговыделения в результате протекания во фронте реакции окисления пропана. Однако эксперимент показал, что сколько-нибудь заметного изменения в скорости и закономерностях распространения фронта в этом случае волны термоокислительного пиролиза (см. рис. 2(4)) не произошло. Вероятно, ускоряющее воздействие дополнительного энерговыделения было скомпенсировано балластирующим действием азота воздуха.

Третий этап работы заключался в том, чтобы осуществить процесс последовательно. В соответствии с этой идеей сначала пропан, находившийся в реакционной трубе при давлении 25 Torr, подвергался предварительному преобразованию в распространяющейся по лазерному лучу волне пиролиза, а затем к продуктам пиролиза было добавлено, как и в предыдущем случае, 125 Torr воздуха. Это привело к фантастическому результату! Средняя скорость распространения фронта волны горения по лазерному лучу в этом случае, как это следует из рис. 2(5), увеличилась в 6–8 раз! Практически видеосъемка регистрировала, что на первом кадре происходило зарождение волны дефлаграции, а уже на следующем кадре, или через кадр ее фронт достигал входного окна. Причем фронт волны распространялся не только в пределах луча, как в предыдущих случаях, а по всему сечению трубы.

Таким образом, предварительный пиролиз пропана приводит к значительному увеличению реакционной способности горючего. Отсюда следует фундаментальный вывод: для дальнейшей интенсификации процессов горения целесообразно перейти на новые принципы сжигания углеводородов, основанные на предварительном преобразовании горючего. Более детально результаты исследований и их теоретическая интерпретация будут представлены в последующих публикациях.

В заключение автор выражает благодарность В.А. Лакутину за помощь в выполнении настоящей работы.

Список литературы

[1] Козлов Г.И., Кузнецов В.А., Сокуренок А.Д. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 11. С. 25–29.

2 Письма в ЖТФ, 1998, том 24, № 6