

**ОБ УСИЛЕНИИ ВОЛН СЖАТИЯ  
ПРИ ГОРЕНИИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ**

*И. С. Заслонко, С. М. Козарко, О. Б. Рябиков*  
(Москва)

В настоящей работе предпринята попытка экспериментально выяснить определяющий механизм усиления волн сжатия в зоне горения. Опыты проводились в наиболее простых условиях: распространение пламени в трубке от открытого конца к закрытому. Использовались предварительно перемешанные смеси пропана с кислородом, разбавленные на 50% азотом. Опыты примерно в таких же условиях проводились в работах [1—4]. Согласно [1], усиление происходит следующим образом: волна сжатия, проходя через зону горения, увеличивает скорость химической реакции в течение некоторого времени релаксации. Благодаря этому выделяется избыточное количество энергии, которое и усиливает волну сжатия. По Маркштейну [5] усиление волны осуществляется благодаря периодическому проявлению и исчезновению ячеистой структуры фронта пламени в ритме с колебаниями давления. В работе [5] отмечалось, что необходимая обратная связь, хотя и не полностью, может осуществляться только вибрационной ячеистой структурой (по терминологии Маркштейна), которая появляется только начиная с некоторой «пороговой» амплитуды колебаний давления. Спонтанная ячеистая структура не имеет отношения к осуществлению обратной связи.

Регистрация излучения пламени в различных спектральных интервалах в принципе позволяет выяснить, изменяется ли протекание химической реакции при горении в условиях вибрационного режима.

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Камера горения 7 (стеклянная трубка с внутренним диаметром 35 мм и длиной 150 мм) была установлена вертикально, с помощью шлифа 5, соединенного системой кранов с вакууметром 4 и смесителем 3, откачивалась и заполнялась исследуемой смесью из смесителя. Смесью зажигалась от искры у открытого конца с помощью впаянных в верхний конец трубки электродов 6. В экспериментах использовался двулучевой катодный осциллограф, с экрана которого велось фотографирование. На один вход (нижний луч) подавался сигнал от датчика давления 14, на второй — сигнал от фотоумножителя 13 типа ФЭУ-19М, питаемого выпрямителем 1. Фотоумножитель был установлен на одной оптической оси с интерференционным фильтром 12, линзой 11 и поворачивающимся зеркалом 8. Вся система была смонтирована на оптической скамье 9 и служила для регистрации светового потока от фронта пламени. колеба-

ния давления регистрировались датчиком пьезокерамического типа с собственной частотой 12 кгц; регистрируемые частоты не превышали 1,5 кгц. Датчик давления тарировался на ударной трубе.

Для исследования вибрационного горения регистрировалось излучение с поверхности фронта пламени через стеклянное окно, установленное на торце камеры горения. Известно [6], что при горении углеводородов очень велико излучение радикалов  $C_2$ ,  $CH$  и некоторых других, причем интенсивность излучения  $C_2$  весьма превышает интенсивность излучения остальных радикалов. При небольшом времени жизни ( $8 \cdot 10^{-9}$  сек) радикал  $C_2$  излучается практически только из зоны химической реакции. Поэтому, вырезая с помощью интерференционного фильтра узкую, порядка 60 Å, спектральную область излучения

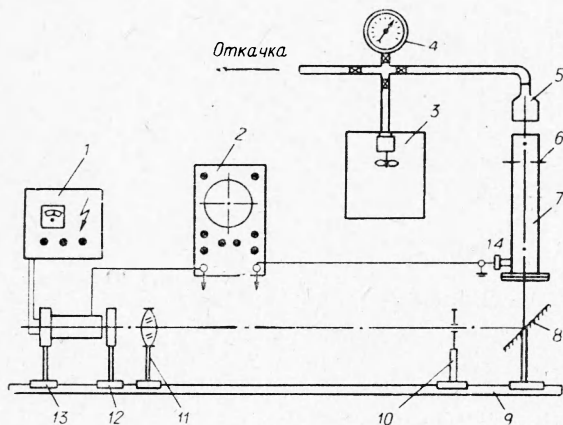


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

$C_2$ , регистрируем излучение только с фронта пламени и, таким образом, можем судить о процессах, происходящих при взаимодействии фронта пламени с волной сжатия. В ряде экспериментов регистрировалось излучение  $NaD$  для этого в трубку перед зажиганием вводился  $NaCl$  в ничтожных количествах, не изменяющих термодинамических свойств смеси. При горении смеси  $NaCl$  испарялся, излучая при этом наиболее интенсивно дублет натрия ( $NaD$ ); это излучение и регистрировалось через соответствующий интерференционный фильтр.

Каждая серия опытов по регистрации излучения с фронта пламени в данном спектральном интервале проводилась в условиях широкого и узкого пучков. Широкий пучок представлял собой излучение со всей поверхности фронта пламени. Узкий пучок получался из широкого вырезанием с помощью нескольких диафрагм светового пучка от фронта пламени. Отношение площади широкого пучка к узкому равнялось 200. Узкий пучок, следовательно, представлял собой локальное излучение с небольшой, порядка нескольких квадратных миллиметров, площади и характеризовал процессы, свободные от возмущений площади фронта пламени, при условии, что ширина зоны остается постоянной. В каждой серии опытов контроль за состоянием поверхности фронта пламени осуществлялся с помощью фоторазвертки через щель, перпендикулярную оси трубки. Оказалось, что возмущения фронта пламени — ячеистая структура — по размеру намного больше площади, вырезаемой с поверхности фронта пламени узким пучком.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При вибрационном горении смеси в трубке амплитуда возникших колебаний давления непрерывно увеличивается, достигая некоторого максимального значения  $p_{max}$ , а затем спадает. Коэффициент усиления волны сжатия определяется как отношение последующей амплитуды волны сжатия к предыдущей. В результате анализа осциллографиче-

ских записей колебания давления при горении смесей пропана с кислородом, разбавленных на 50% азотом, было установлено, что чаще всего процесс усиления разбивается на два участка, где коэффициент усиления волны сжатия остается примерно постоянным для данного  $\alpha$ . Причем оказалось, что на первой стадии горения, соответствующей примерно половине всего времени горения, коэффициент усиления волны сжатия оставался приблизительно одинаковым и равным 1,06 для всех составов от  $\alpha=0,4$  до  $\alpha=2,0$ . После этой стадии, начиная с некоторой «пороговой» амплитуды давления, коэффициент усиления резко увеличивался и имел значения 1,20-1,60 в зависимости от состава смеси. По данным опытов был построен график зависимости амплитуды «порогового» давления от  $\alpha$  (рис. 2).

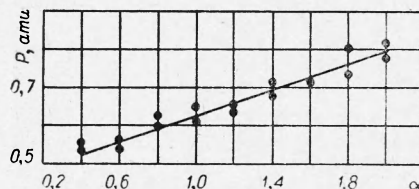


Рис. 2. Зависимость амплитуды «порогового» давления от коэффициента избытка окислителя  $\alpha$  для смесей  $C_3H_8+O_2+50\% N_2$ .

На рис. 3 для иллюстрации приведены одновременные записи колебаний давления и излучения радикала  $C_2$  с фронта пламени для  $\alpha=0,8$ . Регистрация излучения в этом случае производилась со всего фронта пламени. На приведенной осциллограмме видны колебания излучения, частота которых совпадает с частотой колебаний давления. Во всех случаях, как правило, амплитуда пульсаций светового потока увеличивается вместе с увеличением амплитуды колебаний давления, и максимумы пульсаций светового потока и давления достигаются почти одновременно. Следует отметить, что амплитуда пульсаций светового потока вблизи максимальной амплитуды колебания давления зависит от  $\alpha$ : чем смесь беднее, тем меньше эта амплитуда. Нечто похожее наблюдали Цукров и Осборн [7]. Запись колебаний

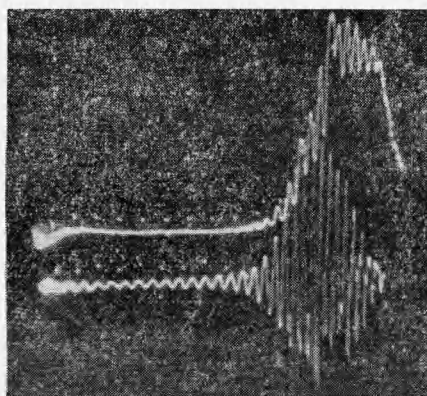


Рис. 3. Осциллограмма излучения  $C_2$  (верхний луч) и давления (нижний луч) для смеси  $C_3H_8+O_2+50\% N_2$ ; широкий пучок, развертка слева направо.

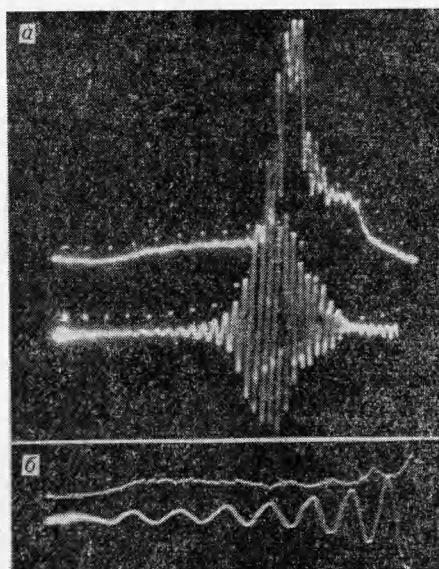


Рис. 4. Осциллограммы излучения  $C_2$  (верхний луч) и давления (нижний луч) для смеси  $C_3H_8+O_2+50\% N_2$ ,  $\alpha=1,2$ , узкий пучок.

$a$  — время развертки 30 мсек, вход осциллографа зашумлен;  $b$  — время развертки 10 мсек, максимальное усиление входа осциллографа.

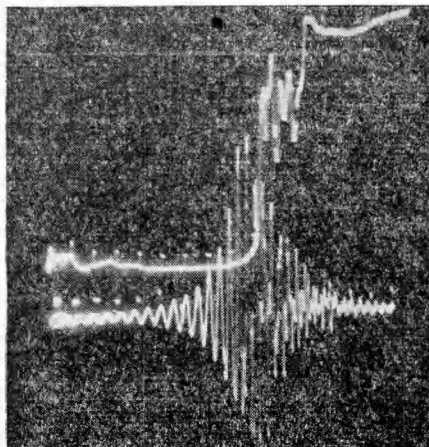


Рис. 5. Осциллограмма излучения NaD (верхний луч) и давления (нижний луч) для смеси  $C_3H_8+O_2+50\% N_2$ ;  $\alpha=1,0$ ; широкий пучок.

давления и излучения  $C_2$  для случая регистрации светового потока с помощью узкого пучка показана на рис. 4, а. Сначала наблюдаются небольшие пульсации светового излучения радикала  $C_2$ , затем вблизи некоторой амплитуды, близко совпадающей с амплитудой «порогового» давления, они резко увеличиваются, достигают своего максимального значения, а затем спадают. Опыты с большим усилением на осциллографе, но с меньшей разверткой по времени, вырезающей лишь начальный участок горения, показали, что колебания давления небольшой амплитуды появляются сразу же после окончания процесса зажигания.

На рис. 5 представлена одно-временная запись давления и излучения NaD при регистрации излучения со всего фронта пламени. При сопоставлении записей излучения  $C_2$  и NaD в этих условиях видно, что они очень похожи в области больших колебаний давления. В начале же горения при небольших амплитудах колебаний давления вплоть до «порогового» значения, колебания излучения NaD с фронта пламени носят хаотический характер. При регистрации узким пучком колебаний излучения NaD не наблюдалось.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ экспериментальных данных позволяет предположить, что при вибрационном распространении пламени по трубке усиление волн давления, вплоть до амплитуд, весьма близких к максимальной, происходит по релаксационному механизму. Усиление, благодаря периодическому изменению площади поверхности пламени, вносит существенный вклад лишь начиная с некоторой «пороговой» амплитуды колебаний давления. При излучении от всего фронта пламени в спектральном интервале NaD регистрируется излучение примеси (NaD), поэтому колебания излучения, если они наблюдаются, вызваны колебаниями площади поверхности фронта пламени. Это подтверждается аналогичными экспериментами при регистрации излучения узким пучком.

Опыты с регистрацией излучения  $C_2$  ( $\lambda=5170 \text{ \AA}$ ) от малого участка фронта пламени показывают, что скорость протекания химической реакции во фронте пламени изменяется с частотой колебания давления (рис. 4, б). Такие пульсации излучения обнаруживаются при самых малых колебаниях давления. Так как радикал  $C_2$  высвечивает лишь из зоны химической реакции и система диафрагм вырезает излучение участка, размеры которого много меньше характерных размеров неоднородностей (ячеек), то можно считать, что колебания свечения, наблюдаемые в этих экспериментах, происходят в результате изменения скорости протекания химической реакции при взаимодействии фронта

пламени с волной сжатия. Опыты в тех же условиях, но с регистрацией излучения  $\lambda=4050 \text{ \AA}$ , обнаруживают пульсации светового потока с частотой колебания давления. В этом спектральном интервале не излучает  $\text{C}_2$ . Излучение в этой области, в частности, вызвано высвечиванием молекулярного кислорода. Существенно, что это излучение, как и излучение  $\text{NaD}$ , происходит не только из узкой зоны химической реакции, но и из горячих продуктов. Эти опыты в сравнении с опытами по регистрации излучения  $\text{C}_2$  показывают, что излучение продуктов реакции не маскирует излучение от участков фронта пламени.

Таким образом, усиление колебаний при распространении пламени по трубке в условиях вибрационного режима происходит следующим образом. После зажигания и заполнения пламенем всего сечения трубки колебания давления в зависимости от горючей смеси или отсутствуют, или очень малы по величине. Фронт пламени имеет серповидную форму или спонтанную ячеистую структуру, не осуществляющую обратную связь колебаний с теплоотводом. На этом участке распространения пламени основным механизмом усиления волны сжатия, по нашему мнению, является релаксационный механизм. Коэффициент усиления волны сжатия при этом составляет несколько процентов. Начиная с некоторой «пороговой» амплитуды колебаний давления фронт пламени становится сильно возмущенным (вибрационная ячеистая структура). На этой стадии горения для усиления колебаний, по-видимому, существенны как релаксационный механизм, так и механизм, связанный с изменением площади поверхности пламени в ритме с колебаниями давления. При этом передняя часть зоны горения, как это видно из фотографий Шмидта [8], по-прежнему состоит из резко очерченного фронта, который периодически распадается на большие ячейки и снова делается плоским. За передней частью зоны горения следует другая, расширенная зона, содержащая объемы свежего газа, в которых продолжается горение.

На этой стадии горения коэффициент усиления волны сжатия составляет десятки процентов. Резкое возрастание коэффициента усиления можно объяснить тем, что увеличивается как эффективная поверхность пламени, так и эффективный объем, в котором протекает химическая реакция. Отметим также, что для активного усиления ударных волн необходимо существование достаточно протяженной области сгоревшего газа [9].

В работе [10] рассмотрен механизм усиления колебаний давления, связанный с равновесным изменением скорости горения под воздействием волны давления. Соответствующий коэффициент усиления волны давления составляет величину менее 1%. Наблюдаемые коэффициенты усиления примерно на порядок выше, поэтому в настоящей работе этот механизм не рассматривается.

*Поступила в редакцию  
6/VI 1966*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Когарко, В. И. Скобелкин. Докл. АН СССР, 1958, 120, 6, 1280.
2. С. М. Когарко, В. И. Скобелкин, А. В. Казаков. Докл. АН СССР, 1958, 122, 6, 1046.
3. С. М. Когарко, А. С. Новиков. Докл. АН СССР, 1960, 134, 1, 125.
4. С. М. Когарко, Д. Л. Рыжков. ЖТФ, 1961, 31, 2, 211.

