

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В ГАЗАХ

Р. И. Солоухин

(Новосибирск)

Переход горения в детонацию может происходить различными путями^[1] в зависимости от конкретных условий течения газа. Причина возникновения детонации связана с ускорением области горения, которая постепенно теряет форму выпуклого ламинарного пламени. Увеличение поверхности пламени приводит к прогрессивному возрастанию скорости сгорания газа, что в свою очередь вызывает увеличение давления, скорости потока и температуры несгоревшей смеси в волне сжатия перед фронтом пламени. Детонационная волна возникает в результате взрывного самовоспламенения адиабатически нагретой смеси в области горения или впереди нее.

Ускоряющаяся область горения может догнать фронт волны сжатия без образования детонации. В этом случае горение и волна сжатия в течение некоторого времени могут распространяться в виде единого комплекса^[2]. Затем такой процесс также завершается взрывом в объеме газа. Если волна сжатия отражается от закрытого конца трубки, взрывное воспламенение может произойти в заторможенном газе за отраженной волной. В случае, когда температура газа за отраженной волной ниже температуры самовоспламенения смеси, роль отраженной волны сводится к дополнительной деформации пламени и увеличению скорости горения.

Существующие схемы расчета формирования детонационной волны (см., например, [1,2], а также [3]) основываются на выяснении условий совместного существования двух разрывов — ударной волны и фронта горения — в процессе их взаимодействия и слияния. Из описанных ниже опытов можно видеть, что скачок давления в ударном фронте волны сжатия перед пламенем значительно меньше увеличения давления в области непрерывного адиабатического сжатия. В таких условиях целесообразно ограничиться приближенной схемой (адиабатическая волна — пламя), вполне отвечающей наблюдениям и позволяющей легко оценить термодинамическое состояние сжатого газа.

1. Расчет состояния газа. Рассмотрим течение, возникающее в длинной трубке постоянного сечения при поджигании смеси у закрытого конца. Впереди фронта пламени распространяется волна сжатия, в общем случае ограниченная спереди ударным разрывом небольшой амплитуды. Будем приближенно считать, что в этой волне на встречных характеристиках сохраняется инвариант Римана

$$u_2 - \frac{2}{\gamma - 1} c_2 = - \frac{2}{\gamma - 1} c_1$$

Величина скорости перемещения области горения относительно стенок трубки определяется суммой скорости потока газа перед пламенем и скорости горения. Для ламинарного пламени эта скорость равна

$$U = u_2 + S = u_2 + S_n \frac{\Sigma}{\sigma}$$

Здесь Σ — площадь поверхности пламени, σ — площадь сечения трубки, а S_n — нормальная скорость горения смеси. Если считать, что сгоревший газ покоится относительно стенок трубки, можно описать движение пламени при помощи следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \rho_2 S &= \rho_3 (S - u_3), & S^2 &= \frac{\rho_3}{\rho_2} \left(\frac{p_3 - p_2}{\rho_3 - \rho_2} \right) \\ u_3 + u_2 &= 0, & \frac{p_3}{\rho_3} \frac{\rho_2}{p_2} &= a \frac{T_1}{T_2} \end{aligned}$$

Последнее выражение является приближенной аппроксимацией опытных данных, приведенных в работе [3].

Для смеси $C_2H_2 + O_2$ величину a можно положить равной 24.3. Степень приближения в этом соотношении, а также отсутствие учета зависимости теплоемкости газа от температуры ограничивают точность расчета состояния газа величиной около 10%.

На фиг. 1 приведены расчетные значения скорости потока u_2 / c_1 (кривая 1), температуры T_2 / T_1 (кривая 2) и давления $p_2 / 10p_1$ (кривая 3) газа перед фронтом пламени в зависимости от отношения величины скорости S к нормальной скорости S_n , которая считается равной 1300 см / сек. Профиль давления, плотности и скорости газа в волне сжатия можно определить при помощи обычных газодинамических методов, если известно изменение скорости горения во времени.

Проведенный расчет не будет правильно описывать явление в том случае, когда начало волны сжатия будет сильным ударным разрывом. Формированию такого разрыва часто отводится особая роль при анализе перехода горения в детонацию, так как слияние горения с этим разрывом считается необходимым условием образования детонации. На самом деле детонация обычно возникает в результате взрывного самовоспламенения в объеме адиабатически нагретой смеси, подобно описанному в [4]. Ниже будут описаны результаты опытов, иллюстрирующих особенности динамики образования детонации в соответствии с указанной расчетной схемой процесса.

2. Возникновение детонации. Для выяснения деталей формирования детонационной волны одновременно с теневой фотографией процесса производилась запись давления в стенке канала двумя импульсными пьезодатчиками с диаметром пьезоэлемента 13 мм. Исследовалась равнообъемная смесь ацетилена с кислородом при начальных давлениях 50—200 мм рт. ст. Размеры взрывного сосуда $4 \times 25 \times 400$ мм. На фиг. 2 воспроизведен кадровый снимок возникновения детонации; на фиг. 3, 4 приведены развертки и осциллограммы давления возникновения детонации (масштаб времени одинаковый; метки времени на осциллограмме 10 мксек).

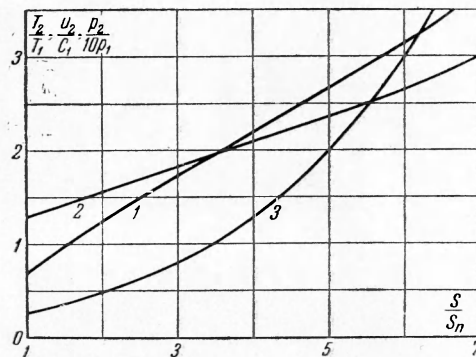
На теневых развертках линиями, параллельными оси времени, отмечены точки, в которых производилась запись давления.

Как видно из кадрового снимка фиг. 2, в начальной стадии форма фронта пламени изменяется слабо. Скорость его перемещения приблизительно равна величине

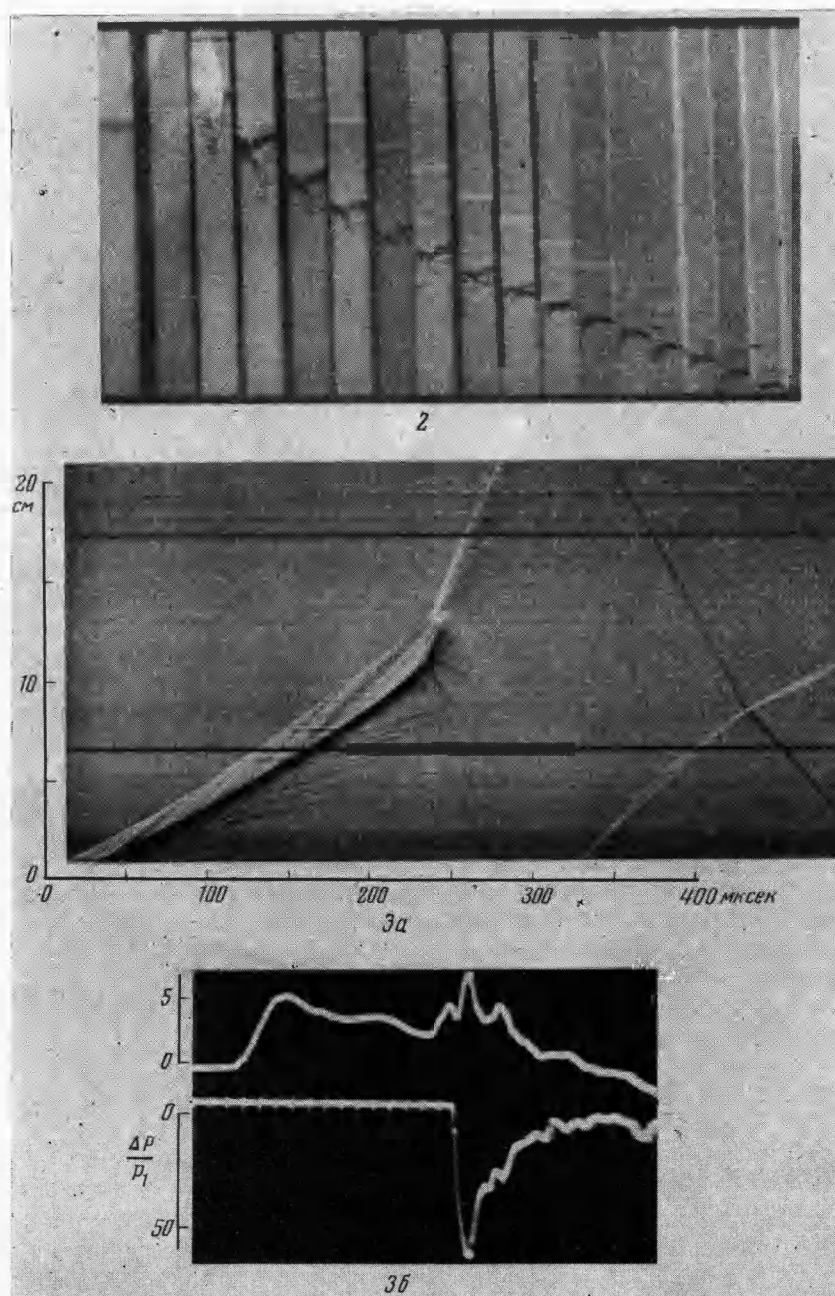
$$u + \frac{\pi}{2} S_n = 365 \frac{m}{сек}$$

соответствующей расчету, в котором форма пламени в плоском канале заменена половиной окружности.

Расстояние, проходимое пламенем от места инициирования без заметной потери формы, в соответствии с известными наблюдениями, в сильной степени определяется качеством обработки внутренней поверхности канала, резко сокращаясь для шероховатых стенок. Кроме того, участок преддетонационного ускорения пламени увеличивается с уменьшением начальной плотности смеси.



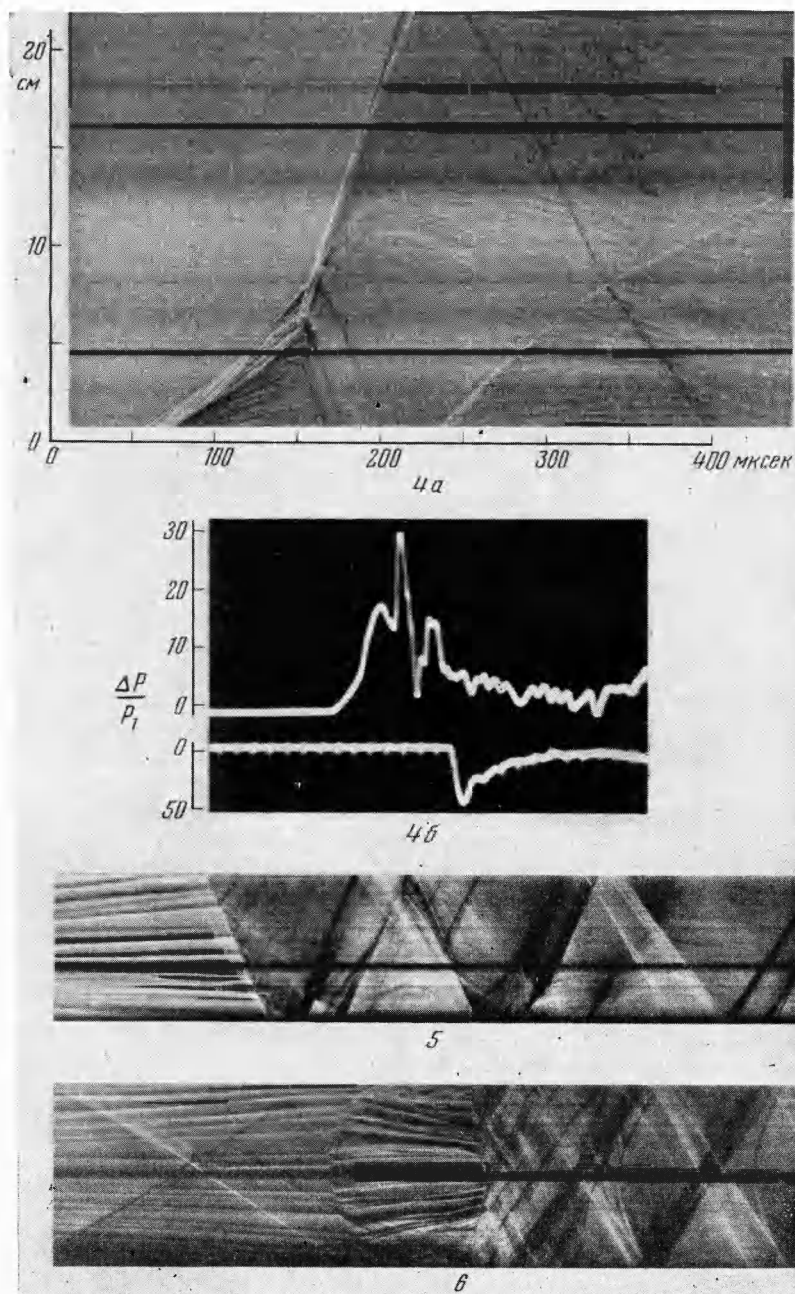
Фиг. 1. Расчетный график состояния газа перед фронтом пламени: 1 — температура; 2 — скорость газа; 3 — давление



Фиг. 2

Фиг. 3 а, б

Записанное датчиком нарастание давления в волне сжатия, предшествующей фронту пламени, отражает предысторию изменения скорости горения. Положение максимума давления в волне сжатия совпадает с началом области горения. Так как область горения имеет конечные размеры, резкого падения давления, соответствующего переходу через фронт пламени, не наблюдается. Абсолютная величина максимального давления в волне сжатия соответствует приведенному выше приближенному расчету процесса.



Фиг. 4 а, б

Фиг. 5

Фиг. 6

Максимальная температура смеси в волне сжатия несколько ниже температуры самовоспламенения, поэтому образования детонационной волны вне зоны горения, как правило, не происходит, если исключена возможность дополнительного торможения сжатого газа.

Из снимков видно, что детонационная волна возникает в результате взрывного воспламенения одного или нескольких объемов смеси в области горения (волна ретонации обычно состоит из нескольких возмущений). Можно предположить следующий механизм возникновения таких взры-

вов. В результате сильного изменения формы пламени отдельные объемы несгоревшей смеси оказываются частично или полностью окруженными пламенем. Дополнительный нагрев газа вследствие местного сжатия может приводить к взрывному объемному самовоспламенению. Осциллограмма взрыва в области горения за волной сжатия показана на фиг. 4.

Возникновение локальных взрывов и детонации может наблюдаться как до того момента, когда область горения догонит фронт волны сжатия, так и после их слияния. В наших опытах существование «комплекса» волна сжатия — пламя наблюдалось обычно при пониженных начальных давлениях смеси. Скорость такой волны около 1000 м / сек , расчетное значение температуры сжатого газа менее 750° К .

3. Определение места возникновения взрыва. Для наблюдения начальной стадии взрыва при переходе горения в детонацию одновременно с разверткой движения пламени производилось фотографирование поля плотности в сечении трубки. В опытах использовалась круглая трубка с внутренним диаметром 10 см и длиной 110 см с торцовыми стенками из оптического стекла. Трубка просвечивалась вдоль оси параллельным пучком света теневой установки. Развертка теневой картины во времени производилась через узкую щель, проходящую через центр окружности сечения. Смесь поджигалась возле торцовой стенки в центре сечения трубки. Опыты показали, что взрыв возникает возле стенок трубки в одной точке или сразу в нескольких точках одновременно. На фиг. 5 показана тепловеская развертка распространения взрыва (поле плотности) из отдельной точки на стенке трубки при образовании детонации в ускоряющейся области горения до отражения волны сжатия от закрытого конца. На фиг. 6 приведена развертка воспламенения после отражения волны сжатия от закрытого конца трубки. На снимке хорошо видны момент отражения (сходящаяся и расходящаяся радиальные волны), проникновение волны сжатия через выпуклую ячеистую поверхность пламени и момент взрыва, распространяющегося от стенок к центру. После взрыва четко фиксируются интенсивные радиальные колебания сгоревшего газа, играющие важную роль при объяснении спиновой детонации.

Поступила 16 V 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Саламандра Г. Д., Баженова Т. В., Зайцев С. Г., Солоухин Р. И., Набоко И. М., Севастьянова И. К. Некоторые методы исследования быстротекающих процессов. Изд-во АН СССР, 1960.
2. Бабкин В. С., Козаченко Л. С. Возникновение детонации в шероховатых трубах. ПМТФ, 1960, № 3.
3. Taylor G. J., Tankin R. S. Gas dynamical aspects of detonation. Fundamentals of gas dynamics, Princeton, 1958.
4. Зайцев С. Г., Солоухин Р. И. К вопросу о воспламенении адиабатически нагретой газовой смеси. ДАН СССР, 1958, т. 122, № 6.