

4. А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. ИФЖ, 1965, 9, 2.
5. А. С. Штейнберг, В. Б. Улыбин и др. ИФЖ, 1966, 10, 4.
6. R. N. Cantrell. AIAAJ., 1963, 1, 1544.
7. А. С. Штейнберг, Н. А. Соколова. Докл. АН СССР, 1964, 158, 2, 448.
8. Л. Б. Вулис. В сб. «Исследование процессов горения натурального топлива». Под ред. Г. Ф. Кнорре. Госэнергоиздат, 1947.
9. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., Изд-во АН СССР, 1947.
10. А. Г. Мержанов, Ф. И. Дубовицкий. Докл. АН СССР, 1959, 129, 1, 153.
11. Я. Б. Зельдович, Д. А. Франк-Каменецкий. Докл. АН СССР, 1938, 19, 693.
12. В. В. Барзыкин, С. И. Худяев. Докл. АН СССР, 1956, 169, 6, 1366.
13. Я. Б. Зельдович. ЖФХ, 1939, 13, 2, 163.
14. М. А. Михеев. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, 1956.
15. R. E. Chaiken, W. N. Andersen a. o. J. Chem. Phys., 1960, 32, 141.
16. T. S. House. J. Chem. Phys., 1966, 45, 1031.
17. В. А. Михельсон. Собрание сочинений. Т. 1. М. изд. «Новый агроном», 1930.

УДК 662.215.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Г. Г. Шелухин, В. Ф. Булдаков, В. П. Белов
(Ленинград)

Процесс горения гетерогенных конденсированных систем изучался рядом авторов [1—3], но многие существенные стороны механизма горения этих систем выяснены недостаточно полно. В настоящей работе получены новые результаты, относящиеся как к самому процессу горения гетерогенных конденсированных систем, так и к скорости их горения.

В качестве гетерогенной системы была взята механическая смесь порошкообразного окислителя и неплавящейся высокополимерной связки. Эксперименты проводились в широком диапазоне давления от вакуума до 100 бар. Для работы с повышенным давлением была использована установка, оптическая схема которой представлена на рис. 1.

Основной частью установки являлась камера, снабженная прозрачными окнами. Давление в ней создавалось подачей азота. Для того чтобы атмосфера в камере и окна сохраняли необходимую прозрачность, азот в камеру подавался непрерывно. Опыты проводились также в полузамкнутом объеме, где давление создавалось продуктами собственного разложения конденсированной системы.

Исследуемый образец имел прямоугольное сечение размерами $3 \times 1,5$ см и толщиной от 0,2 до 1 см.

Для определения скорости горения была использована скоростная макро-микросъемка, которая производилась кинокамерой СКС-1М с объективом Ю-3 или телемикроскопом при увеличении $2 \div 6$ со скоростью 1000 ÷ 2000 кадр/сек.

Температурный профиль в твердой фазе измерялся с помощью платино-платинородиевых термодпар с диаметром проволоочки 20 мк. Соответствие между кинокадрами процесса горения и полученными температурными профилями, а также промежутки времени между отдель-

ными кадрами устанавливались специальным отметчиком кадров, вмонтированным в кинокамеру [4].

Температурное поле в газовой фазе определялось цветовым оптическим методом, для чего была изготовлена специальная компенсационная призма к кинокамере с двумя светофильтрами [5]. При этом осуществлялась съемка объекта изучения в двух длинах волн с последующей обработкой полученных кадров на плотность почернения с помощью микрофотометра.

Обработка кинограмм на скорость горения производилась с помощью проектора при общем увеличении $30\text{--}120\times$ на экране, где строи-

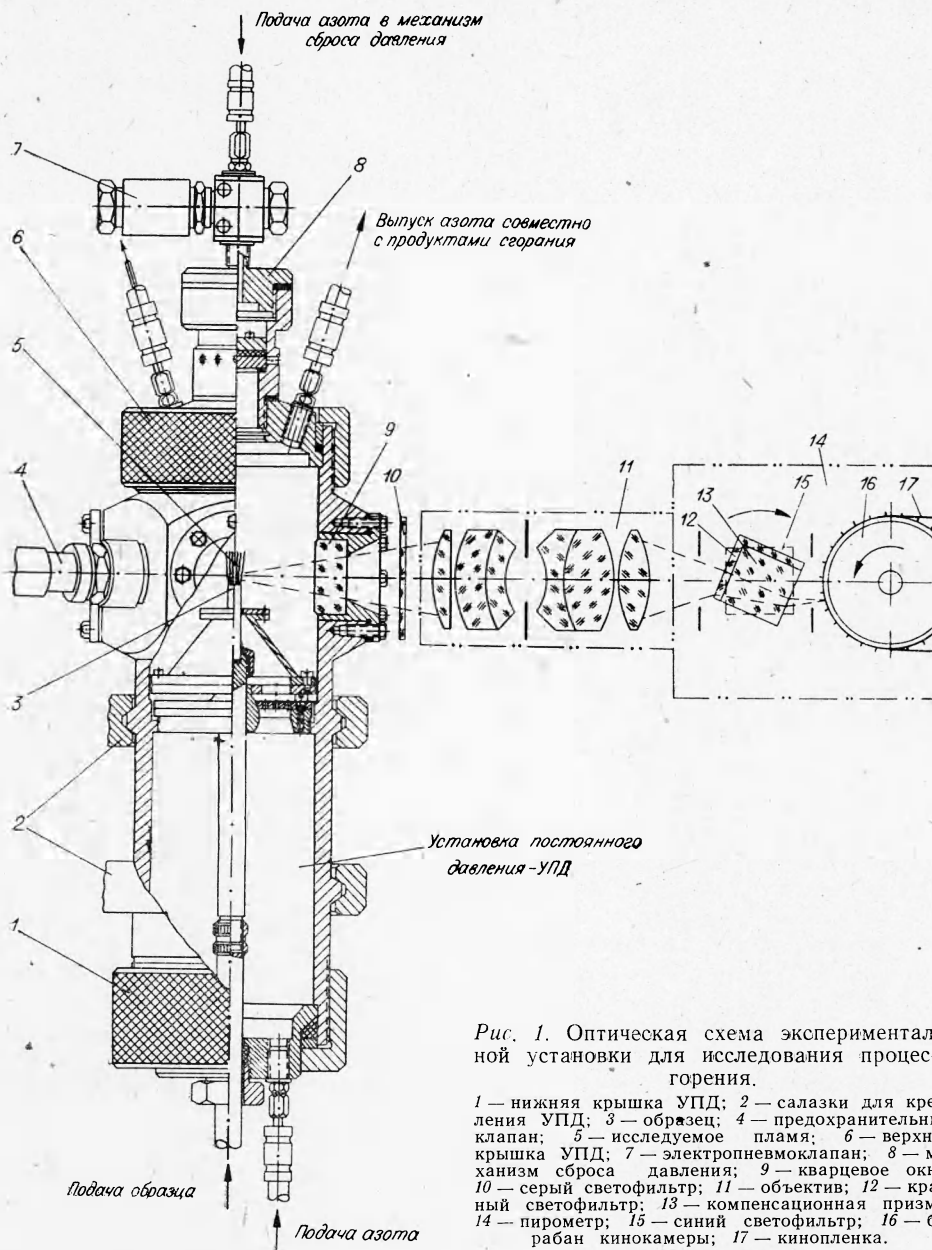


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки для исследования процесса горения.

1 — нижняя крышка УПД; 2 — салазки для крепления УПД; 3 — образец; 4 — предохранительный клапан; 5 — исследуемое пламя; 6 — верхняя крышка УПД; 7 — электропневмоклапан; 8 — механизм сброса давления; 9 — кварцевое окно; 10 — серый светофильтр; 11 — объектив; 12 — красный светофильтр; 13 — компенсационная призма; 14 — пирометр; 15 — синий светофильтр; 16 — барабан кинокамеры; 17 — киноплёнка.

лись последовательные положения поверхности горения через определенные промежутки времени. На каждом кадре замерялось расстояние от репера до поверхности горения по линиям, нормальным к поверхности горения и расположенным на некотором расстоянии друг от друга (рис. 2). Такой способ обработки позволил определять местную текущую скорость горения конденсированной системы. Анализ точности показал, что полученные в опыте отклонения текущих значений скорости горения от средней лежат за пределами ошибок измерения.

Результаты обработки одного из экспериментов изображены на графике перемещение — время (рис. 3). Анализ большого числа аналогичных графиков в широком диапазоне давлений показал, что точка пересечения поверхности и любой нормали к поверхности горения гетерогенной конденсированной системы перемещается не непрерывно, а периодически. Это значит, что зафиксированная на поверхности точка какой-то промежуток времени перемещается, а затем ее перемещение

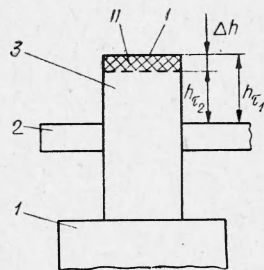


Рис. 2. Схема измерения текущей скорости горения.
1 — державка; 2 — репер; 3 — образец. I, II — положения поверхности горения соответственно в моменты времени τ_1 и τ_2 .

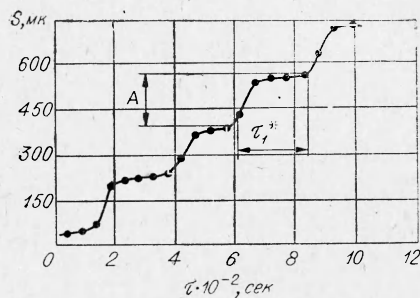


Рис. 3. Типичный график перемещения поверхности горения в функции времени.

прекращается. По истечении некоторого времени перемещение и остановка повторяются. Остановка может быть отождествлена с подготовкой некоторого слоя конденсированного вещества к выгоранию, а перемещение может быть отождествлено с выгоранием этого слоя. Точнее, цикл включает в себя быстрое и медленное перемещение, так как остановка (в буквальном смысле этого слова) не имеет места.

Указанное периодическое перемещение присуще любой точке поверхности горения. Однако исследование позволило установить, что одновременно перемещаются точки, принадлежащие не всей поверхности горения, а лишь ее определенным участкам. Такой участок поверхности был назван «локальной зоной». Но непосредственно к одной локальной зоне примыкает другая, у которой перемещение всех точек поверхности происходит тоже одновременно и периодически, но не совпадает во времени с перемещением точек поверхности первой локальной зоны. Таким образом, в соседних локальных зонах периодический процесс горения как бы сдвинут по фазе: когда в одной локальной зоне перемещение поверхности происходит с большей скоростью, то в соседней локальной зоне перемещение происходит с меньшей скоростью.

Горение гетерогенных конденсированных систем по локальным зонам при наличии периодичности имеет весьма большое значение. Так как в процессе подготовки очередного слоя конденсированного вещества к ускоренному выгоранию происходят неполные химические реакции между частично газифицируемыми компонентами системы, и,

следовательно, собственное тепловыделение в слое невелико, то часть теплового потока, необходимого для завершения подготовки этого слоя к ускоренному выгоранию, поступает от соседних локальных зон.

Горение конденсированного вещества по всей поверхности в целом осуществляется и поддерживается всеми одновременно горящими зонами, общая поверхность которых в любой момент времени составляет $\sim 1/3$ всей поверхности.

Если считать, что единичный цикл включает в себя период подготовки и период выгорания очередного слоя, то частота f периодического процесса горения будет обратна времени цикла. Тогда скорость горения u можно рассматривать как произведение частоты f на амплитуду A . При этом под амплитудой понимается толщина слоя конденсированной системы, выгорающая за один цикл, т. е. $u = f \cdot A$.

Частота и амплитуда зависят от тех же факторов, от которых зависит и скорость горения, т. е. от давления окружающей среды, начальной температуры образца, скорости газового потока вдоль горящей поверхности и от других факторов, способных изменить тепловой поток, поступающий в конденсированную систему.

Было проведено большое количество опытов в разнообразных условиях сжигания в широком диапазоне давлений. Во всех опытах наиболее точно фиксированным параметром является скорость горения. Поэтому частота и амплитуда определялись как функции скорости горения. Приводим результаты измерений величины локальной зоны по поверхности горящей конденсированной системы:

u , см/сек	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
f , гц	2,5	6	12	20	27	36	45,5	56
A , мк	400	333	250	200	185	167	153	140
l_z , см	0,19	0,135	0,111	0,085	0,07	0,0625	0,0525	0,0475

В области рассматриваемых давлений скорость горения зависит от давления. Эксперимент показал, что амплитуда и размер локальной зоны существенно уменьшаются с ростом давления (скорости горения), а частота соответственно растет (рис. 4). Исходной причиной образования локальных зон является неоднородность структуры топлива, а формирование размера локальной зоны определяется тепловыми факторами.

С ростом давления скорость тепловыделения в конденсированной и газовой фазах увеличивается, в связи с чем размер области, в которой теплоприход превышает теплорасход и создаются необходимые условия для ускорения горения, может уменьшаться, что соответствует уменьшению размера (диаметра) локальной зоны.

Большой интерес представляет дальнейшая детализация процесса горения, касающаяся структуры области горения. Под областью горения понимается расстояние, на протяжении которого температура изменяется от начальной температуры образца до конечной температуры продуктов сгорания.

Область горения гомогенных систем подробно исследовалась ранее, например в работе [6]. Было установлено, что область горения начинается в конденсированной фазе и заканчивается в газовой, включая в себя несколько зон. Протяженность отдельных зон и всей области горения изменяется при изменении давления, однако считается, что при данном давлении протяженность зон сохраняется постоянной и вся область горения в процессе горения перемещается параллельно самой себе со скоростью, равной скорости горения.

Таким образом, область горения обычно принимается квазистационарной. Экспериментально протяженность области горения и ее отдельных зон как для гомогенных, так и для гетерогенных систем определяется чаще всего с помощью термопар. Однако поскольку определение размеров отдельных зон горения при использовании термопарного метода производится по тем или иным резким изменениям температуры на кривой температура—время, то нельзя с достаточной достоверностью оценить размер отдельных зон и привязать их к поверхности или к определенной точке области горения. Применение только термопарного метода принципиально исключает возможность исследования динамической структуры зон горения.

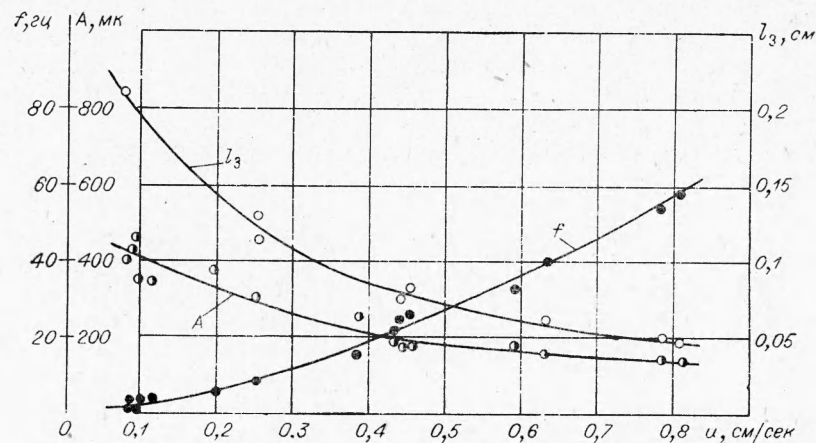


Рис. 4. График зависимости частоты, амплитуды и размера локальной зоны в функции средней скорости горения.

Использование в наших экспериментах микросъемки в сочетании с термопарными измерениями и оптическим методом измерения температуры позволило уточнить как квазистационарную структуру области горения гетерогенных систем, так и с достаточной точностью провести определение динамических параметров этой области. Как известно, с помощью термопары на юсциллограмме фиксируется температура как функция времени. Так как на кинограмме процесса горения, начиная с некоторого момента времени после выхода термопары в газовую фазу, ее положение на кадре может быть строго определено, то с помощью отметчика кадров, зная текущую скорость горения, можно установить температуру на границах отдельных зон.

В квазистационарном приближении нами было установлено, что вся область горения может быть разделена на пять зон: подогрева, разложения в к-фазе (рис. 5), газификации связки, гетерогенных реакций и газовых реакций.

В зоне подогрева температура изменяется от начальной температуры образца T_0^* до температуры начала разложения $T_{н.р}$ гетерогенной системы. В этой зоне химические реакции не идут, а тепло в нее поступает за счет теплопроводности. В зоне разложения температура изменяется от $T_{н.р}$ до температуры газификации связки $T_{г.}$

Температура начала разложения может быть достаточно точно определена измерением электропроводности твердой фазы. При обычных температурах гетерогенная система является диэлектриком, а при $T_{н.р}$ наблюдается появление проводимости. Для используемой систе-

мы $T_{н.р.}$, зафиксированная на фотографии путем совмещения положения термпары с границей реакционной зоны, с одной стороны, и с точкой начала проводимости — с другой, дает величину $\sim 400^\circ\text{C}$. На протяжении зоны разложения в к-фазе происходит подготовка к переходу связки в газообразное состояние. На верхней границе этой зоны связка достаточно интенсивно, хотя и не полностью, переходит в газообразное состояние при $T_r \cong 600 \div 700^\circ\text{C}$. В связи с четко фиксируемым фазовым переходом верхнюю границу зоны разложения можно считать поверхностью горения.

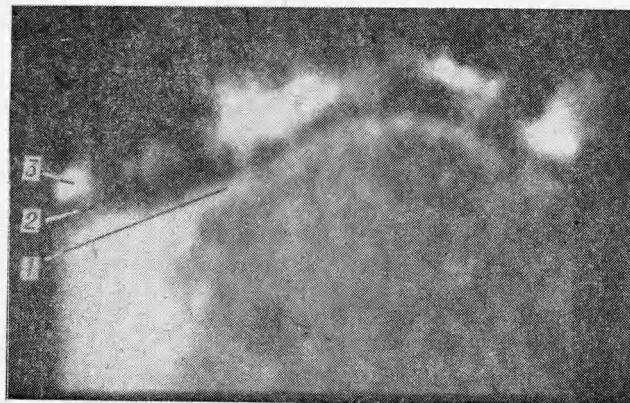


Рис. 5. Зоны горения в к-фазе:
1 — разложения; 2 — газификации связки; 3 — гетерогенных реакций.

Над поверхностью горения расположена зона газификации связки, хотя, видимо, в этой зоне имеются не только продукты газификации связки, но и частично продукты поверхностного разложения кристаллов окислителя. Толщина зоны газификации связки составляет $100 \div 20 \text{ мк}$ при давлении $(1 \div 30) \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$.

На верхней границе зоны газификации имеет место активное разложение окислителя, проявляющееся свечением кристаллов окислителя. Поэтому следующая зона названа зоной гетерогенных реакций. Протяженность зоны гетерогенных реакций определяется наличием разлагающихся кристаллов окислителя. Нижняя граница этой зоны отвечает началу интенсивного разложения окислителя и по нашим измерениям имеет $T_{ок} \cong 1000 \div 1100^\circ\text{C}$. Над зоной гетерогенных реакций располагается зона газовых реакций, продолжающаяся до достижения максимальной температуры газообразных продуктов.

Так может быть представлена квазистационарная картина области горения гетерогенной системы.

В действительности область горения даже при постоянном давлении складывается из непрерывно изменяющихся зон горения, т. е. имеет место динамическая картина области горения, которая может быть описана следующим образом.

Пусть имеется фиксированная часть поверхности (рис. 6). Под влиянием внешнего теплового потока, идущего, например, от соседних локальных зон, образец пропревается, в нем образуются пропретый слой, зона разложения в к-фазе и начинается газификация связки. Зона разложения в к-фазе образуется перемещением поверхности, имеющей температуру $T_{н.р.}$. Поверхность $T_{н.р.}$ не является ровной, вдоль ее по-

верхности через $150 \div 200 \text{ мк}$ имеют место отдельные выступы, обусловленные, видимо, физической неоднородностью системы. Эти выступы передвигаются в глубину прогретого слоя со скоростью $V_{н.р}$ (рис. 6, 1). После перемещения на $\sim 100 \div 200 \text{ мк}$ передвижение вглубь замедляется и начинается рост выступов в поперечном направлении. Часть выступов объединяется, граница $T_{н.р}$ выравнивается, образуя локальную зону. Скорость перемещения границы $T_{н.р}$ становится максимальной (рис. 6, 2).

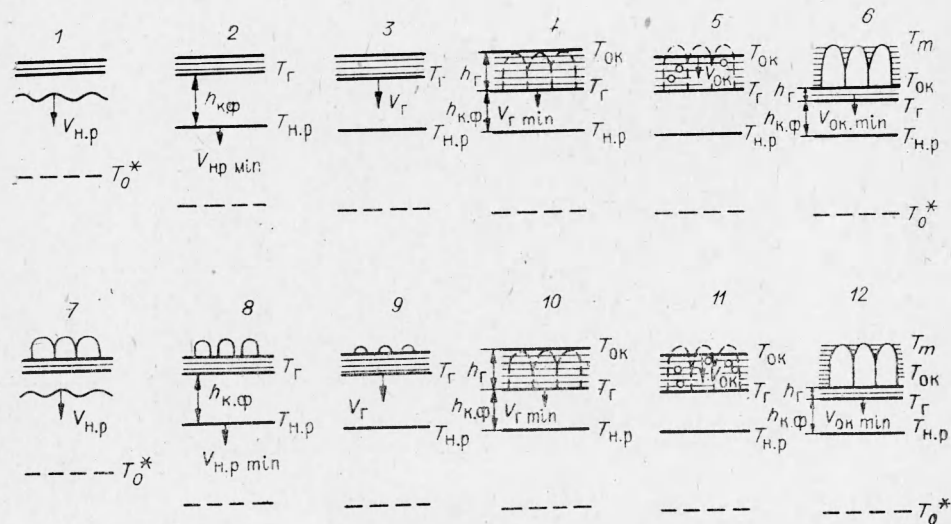


Рис. 6. Схема динамической структуры области горения гетерогенной конденсированной системы.

Внешний тепловой поток продолжает действовать, и все большая масса связки газифицируется. Кристаллы окислителя оказываются под воздействием газообразных продуктов разложения связки и тоже частично газифицируются с поверхности. Между продуктами газификации связки и окислителя протекают химические реакции, сопровождающиеся повышением температуры. Толщина слоя газификации связки продолжает расти, при этом граница $T_{г}$ перемещается со скоростью $V_{г}$, которая оказывается больше, чем скорость перемещения плоскости с температурой $T_{н.р}$. Поэтому толщина зоны разложения в к-фазе $h_{к.ф}$ уменьшается. Когда толщина зоны газификации связки $h_{г}$ достигает определенной величины, на большей части этой зоны появляются сначала небольшие, а затем увеличивающиеся светящиеся очаги, представляющие собой реагирующие кристаллы окислителя (рис. 6, 3, 4). Минимальная температура, соответствующая светящимся кристаллам, может быть названа температурой начала интенсивного разложения окислителя и обозначена $T_{ок}$.

Таким образом, зона газификации связки уменьшается, но зона гетерогенных реакций возрастает до определенной толщины (рис. 6, 5, 6). После этого большая часть кристаллов окислителя сгорает, продолжающий поступать из зоны гетерогенных реакций и соседних локальных зон тепловой поток обеспечивает возобновление цикла, приводя последовательно сначала к увеличению $V_{н.р}$ и зоны разложения в к-фазе (рис. 6, 7, 8), а затем зоны газификации связки, так как $V_{н.р}$ постепенно замедляется, а $V_{г}$ растет (рис. 6, 9, 10). Как только толщина зо-

ны газификации связки достигает определенной величины, так снова на большей части ее толщины появляются светящиеся очаги, происходит выгорание кристаллов окислителя, увеличение зоны гетерогенных реакций и уменьшение зоны газификации (рис. 6, 11, 12). Затем описанные процессы повторяются.

Из описанного выше следует, что скорости перемещения поверхностей, имеющих температуры $T_{н.р.}$, T_r , $T_{ок.}$, являются переменными, причем соотношение максимальных и минимальных скоростей перемещения каждой границы в одном цикле составляет в среднем 4:6.

Таким образом, процесс горения отдельной локальной зоны является в принципе нестационарным. Время подготовки слоя к выгоранию определяется временем образования h_r . Эта толщина может рассматриваться как критическая, по достижении которой теплоприход в зоне газификации превышает расход тепла, что ведет к резкому повышению температуры и выгоранию кристаллов окислителя, т. е. к завершению перехода твердой массы в газообразное состояние.

Область горения включает в себя не только конденсированную, но и газовую фазу. Поэтому исследование процесса было бы неполным, если бы не рассматривались процессы в газовой фазе. Как отмечалось выше, газовая фаза исследовалась оптическими методами.

Картина горения в газовой фазе меняется с изменением давления, однако наиболее характерные особенности процесса горения сохраняются при всех давлениях. Первая особенность заключается в том, что из каждого очага окислителя и из соседнего очага связки вытекают индивидуальные струйки, ширина которых равна размеру очага (рис. 7).

Температура по длине струек возрастает до максимального значения на некотором расстоянии от поверхности горения. По достижении максимума температура сначала слабо, а затем быстро уменьшается в связи с охлаждением (рис. 8). Максимальная температура соседних струек горючего и окислителя отличается на $\sim 100\text{--}150^\circ\text{K}$. Подобная разница температуры может объясняться или различной величиной излучательной способности струек горючего и окислителя, или эффектом осреднения измерения по струйкам, которые могут иметь сложный характер распределения температуры.

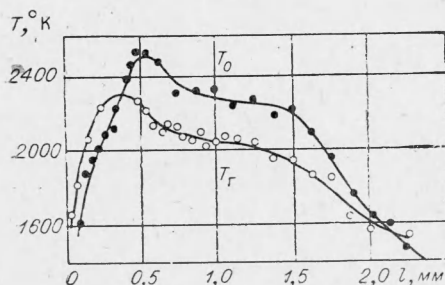


Рис. 8. Распределение температуры по длине струек горючего и окислителя, $p = 15 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$.

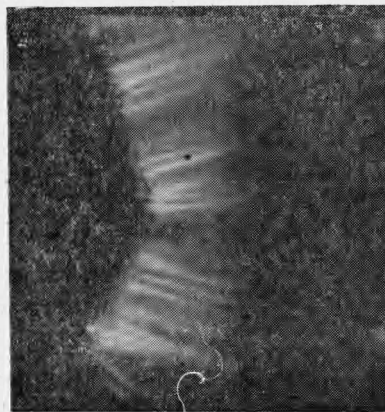


Рис. 7. Микроструктура газовой фазы.

При внимательном рассмотрении газовой фазы помимо отдельных струек можно обнаружить пучки струек различной светимости (рис. 9), размеры которых соответствуют ширине локальных зон, зафиксированных в твердой фазе.

Можно было предположить, что более яркие пучки струй соот-

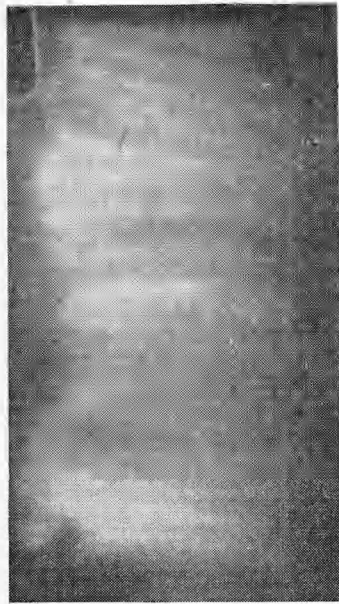


Рис. 9. Локальная структура газовой фазы.

ветствуют горящим локальным зонам, а менее яркие тем локальным зонам, которые подготавливаются к выгоранию. Действительно, измерения температуры отдельных струек, формируемых кристаллами окислителя, но находящихся в различных локальных зонах, показали, что температура струек в горящих и негорящих зонах может отличаться на $700\text{--}800^\circ\text{K}$. В связи с этим представляли интерес измерения температуры газовой фазы вдоль поверхности горения в плоскости, отстоящей на одинаковом расстоянии от поверхности горения. Измерения показали, что вдоль поверхности горения температура изменяется не только от струйки к струйке, но и от локальной зоны к локальной (рис. 10). И если температура соседних струек горючего и окислителя в одной локальной зоне отличается на $\sim 100\text{--}150^\circ\text{K}$, то перепад температур между горящими и негорящими зонами достигает $700\text{--}800^\circ\text{K}$.

Большое значение представляло исследование изменения температуры как функции времени в некоторой точке газовой фазы, находящейся на зафиксированном расстоянии от поверхности локальной зоны. Оказалось, что в этой точке температура газовой фазы колеблется с частотой, соответствующей частоте выгорания локальной зоны в твердой фазе, и разница в температурах газовой фазы над рассматриваемой локальной зоной в период подготовки и в период выгорания составляет $700\text{--}800^\circ\text{K}$ (рис. 11).

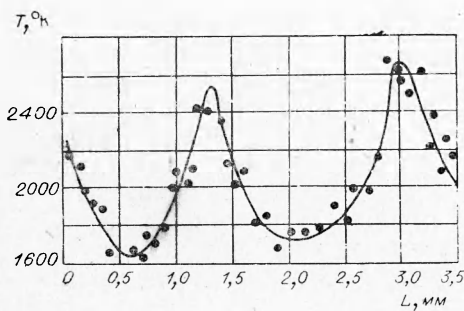


Рис. 10. Распределение температуры по ширине пламенной зоны, $h=0,5$ мм, $p=15 \cdot 10^5$ н/м².

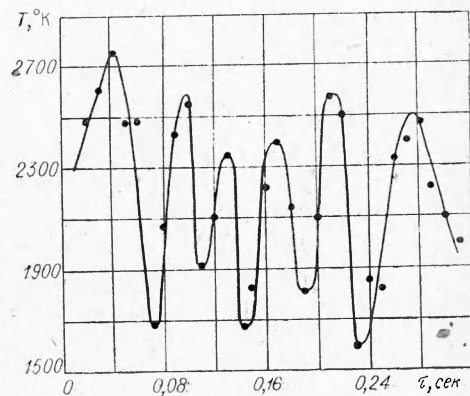


Рис. 11. Температура в фиксированной точке газовой фазы в функции времени, $p=20 \cdot 10^5$ н/м², $f=22$ гц.

Таким образом, исследования газовой фазы подтвердили локально-колебательный характер горения гетерогенных конденсированных систем и подчеркнули взаимосвязь конденсированной и газовой фаз.

Поступила в редакцию
15/VII 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., «Наука», 1966.
2. М. Саммерфилд. В сб. «Исследование ракетных двигателей на твердом топливе». ИЛ, 1963.
3. Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем. М., «Наука», 1967.
4. Г. Г. Шелухин, В. О. Юдин. Техника кино и телевидения, 1967, 6.
5. Г. Г. Шелухин, В. О. Юдин. Теплофизика высоких температур, 1967, 4, 5, 928.
6. П. Ф. Похил. Сб. «Физика взрыва», 1953, № 2.

УДК 536.46

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Б. Н. Кондриков
(Москва)

Существование особого типа неустойчивости горения взрывчатых веществ (ВВ), связанной с тепловой инерционностью прогретого слоя конденсированной фазы, было предсказано в работе [1]. В первоначальном варианте теории рассматривалось неустойчивое горение ВВ или пороха, эндотермически газифицирующихся с поверхности под действием потока тепла, передающегося теплопроводностью из зоны реакции в газовой фазе. Некоторые выводы работы [1] представлялись необычными и требовали экспериментальной проверки. Отметим из них следующие: 1) горение затухает, если начальная температура ВВ ниже некоторой критической; 2) критический диаметр горения конденсированных ВВ зависит от начальной температуры сильнее, чем у газов, стремясь к бесконечности при приближении к критической температуре; 3) скорость горения при диаметре, равном критическому, меньше отличается от адиабатической, чем теоретическая предельная скорость горения газов. При критической начальной температуре две первые скорости совпадают; 4) при повышении начального давления критический диаметр горения может не только уменьшаться, но и возрастать. Существует некоторое критическое давление, выше которого горение невозможно.

В работе [2] было показано, что при горении баллиститного пороха первое условие не выполняется. Для метилнитрата и нитрогликоля такого противоречия обнаружено не было. В ряде других экспериментальных работ, проведенных в этой области, были получены отдельные факты, которые можно было рассматривать как подтверждение теории, однако рассматривались они иначе.

В настоящей работе предпринята попытка сравнить выводы теории Я. Б. Зельдовича [1] с опытом на примере некоторых вторичных ВВ.

1. Критическая начальная температура ВВ, ниже которой его горение без обмена теплом с окружающей средой неустойчиво, определяется из соотношения

$$k = \beta (T_k - T_0^*) = 1, \quad (1)$$

где k — критерий Зельдовича; $\beta = \frac{d \ln m}{d T_0}$ — температурный коэффициент