

Рис. 4.

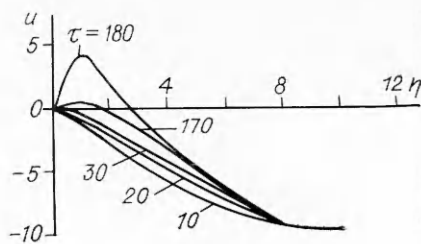


Рис. 5.

(8). Нестационарные характеристики зажигания представлены на рис. 3 функцией  $\varphi(\delta, u_0) = \tau_a/\tau^*$ , где  $\tau_a = \tau_a(\delta)$  — время задержки зажигания как функция от  $\delta$  при  $\alpha = 1$ ;  $\tau^*$  — время задержки зажигания при  $\alpha = 0$ ;  $\tau^*$  как функция различных параметров задачи исследована в [4, 5]. На рис. 4 представлены профили решения  $u(\eta, \tau)$  через промежуток времени  $\Delta\tau = 10$ ,  $\alpha = 0$ ,  $u_0 = -10$ ; на рис. 5 — профили решения  $u(\eta, \tau)$  для варианта:  $\alpha = 1$ ,  $u_0 = -10$ ,  $\delta = 7,3$ . Для этого варианта  $\delta_{\max} = 7,1$ , следовательно,  $7,1 < \delta_{кр} < 7,3$ . Решение  $u(\eta, \tau)$  долго находится вблизи стационарного решения, поскольку  $\delta$  близко к  $\delta_{кр}$ .

Таким образом, несмотря на то, что рассматривается зажигание полубесконечной реагирующей среды, наличие переменного по координате теплоотвода приводит к существованию критических условий. При каждой фиксированной температуре инициирования существует предельное значение толщины теплоизолированного слоя, зависящего от интенсивности теплоотвода вне его, выше которого зажигание будет иметь место. Область над кривыми на рис. 2 соответствует зажиганию, под кривыми — его отсутствию. Это по сути дает возможность определить минимально необходимый участок реагирующей среды, который необходимо теплоизолировать, чтобы при имеющей место интенсивности теплоотдачи зажигание было осуществлено.

В заключение отметим, что примененный здесь метод можно использовать в широком круге задач, в которых содержатся параметры, кусочно-постоянно зависящие от пространственной координаты.

Авторы выражают признательность С. И. Худяеву за внимание к работе и полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980.
2. Барзыкин В. В., Худяев С. И. Докл. АН СССР, 1966, 169, 6, 1366.
3. Вольперт А. И., Худяев С. И. Анализ в классах разрывных функций и уравнения математической физики. — М.: Наука, 1975.
4. Аверсон А. Э., Барзыкин В. В., Мержанов А. Г. Докл. АН СССР, 1965, 169, 1, 158.
5. Merzhanov A. G., Averson A. E. Comb. Flames, 1974, 16, 1, 89.

*п. Чернооголовка*

*Поступила в редакцию 5/IX 1988,  
после доработки — 6/XII 1988*

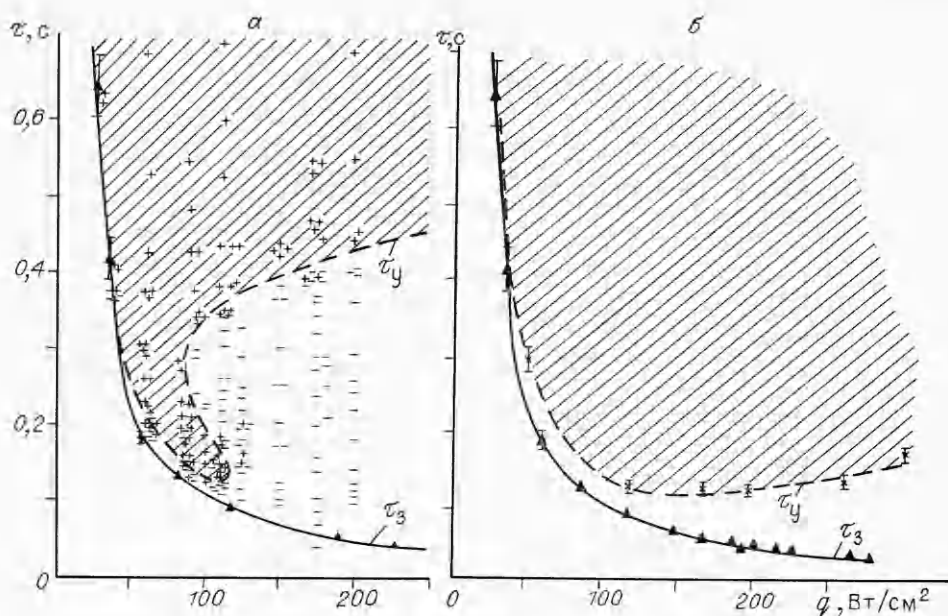
УДК 536.46 : 535.21.215

*В. П. Марусин, В. Т. Кузнецов, А. И. Скорик*

### ОСОБЕННОСТИ УСТОЙЧИВОГО ЗАЖИГАНИЯ СИСТЕМЫ ПХА + УРОТРОПИН ТЕПЛОВЫМ ИМПУЛЬСОМ

Известно, что в теории зажигания конденсированных веществ наименее исследован вопрос об устойчивости зажигания, т. е. условиях перехода от зажигания, определяемого по появлению пламени, к самоподдерживающемуся горению после прекращения теплового воздействия.

© 1990 Марусин В. П., Кузнецов В. Т., Скорик А. И.



Зависимость времени зажигания образцов А (а) и Б (б) от плотности лучистого потока (значки + и — относятся к устойчивому зажиганию и погасанию образцов).

В связи с этим представляют интерес экспериментальные данные, позволяющие выявить особенности механизма устойчивого зажигания.

В настоящей работе проведено исследование процесса зажигания системы перхлорат аммония (ПХА) + уротропин, на которой обнаружено необычное влияние плотности лучистого потока  $q$  на устойчивость зажигания.

Образцы диаметром 1 и высотой 0,6 см готовили глухим прессованием смеси ПХА и уротропина с добавкой 1 % сажи до плотности  $1,75 \text{ г/см}^3$ . Использовали ПХА с удельной поверхностью 6000 (образцы А) и  $3000 \text{ см}^2/\text{г}$  (образцы Б). Размеры частиц уротропина во всех случаях не превышали 300 мкм. Коэффициент избытка окислителя для смеси равен 1,2. Опыты проводили в среде воздуха при атмосферном давлении и комнатной температуре на установке лучистого нагрева Уран-1, значения  $q$  изменяли от 25 до  $300 \text{ Вт/см}^2$ . Длительность облучения образцов задавали с помощью дискового затвора. Время раскрытия (закрытия) затвора, оцененное по изменению сигнала фотодиода, установленного на месте исследуемого образца, составляло 3 % от времени облучения.

Момент зажигания  $\tau_3$  определяли по появлению пламени, регистрируемого фотодиодом, и по точке перегиба на температурной кривой разогрева термпары, расположенной на высоте 2 см от облучаемой поверхности образца. Длительность теплового импульса  $\tau_y$ , обеспечивающего самоподдерживающееся горение образца после отсечки излучения, определяли по методу да — нет. Увеличение времени раскрытия (закрытия) затвора в 2 раза во всем диапазоне  $q$  не приводит к заметному изменению  $\tau_3$  и  $\tau_y$ . В отдельных случаях проводили киносъемку процесса зажигания камерой СКС-1М.

Зависимости времени зажигания от плотности лучистого потока представлены на рисунке. При  $q \leq 100 \text{ Вт/см}^2$  значения  $\tau_y$  и  $\tau_3$  для образцов А близки между собой и монотонно уменьшаются с ростом  $q$ . При  $q > 100 \text{ Вт/см}^2$   $\tau_3$  продолжает убывать, а  $\tau_y$  возрастает при увеличении лучистого потока. Подобную зависимость  $\tau_y(q)$  наблюдали в случае зажигания нитроцеллюлозы со связующим [1]. Для состава с ПХА такая зависимость получена, по-видимому, впервые.

Существенно другой ход имеет кривая  $\tau_y(q)$  для образца Б. До  $q \approx 90$  Вт/см<sup>2</sup> значения  $\tau_y$  и  $\tau_3$  практически совпадают с данными, полученными для образцов А. При  $q > 130$  Вт/см<sup>2</sup>  $\tau_y$  на порядок превышает  $\tau_3$  и не уменьшается при увеличении  $q$ . При этом время переоблучения образцов ( $\tau_y - \tau_3$ ) в несколько раз больше, чем для образцов А. В переходной области  $90 < q < 130$  Вт/см<sup>2</sup> кривая  $\tau_y(q)$  имеет S-образный вид и существуют не одна, а две области значений  $\tau$ , обеспечивающих устойчивое зажигание. Например, при  $q = 110$  Вт/см<sup>2</sup> устойчивое зажигание происходит, когда  $0,12 \leq \tau \leq 0,18$  с и при всех  $\tau \geq 0,33$  с. Облучение образцов с  $0,18 < \tau < 0,33$  с не приводит к устойчивому зажиганию. Закономерности зажигания системы ПХА + уротропин в области  $q \leq 90$  Вт/см<sup>2</sup> совпадают с закономерностями, полученными в теории [2] при слабом подводе тепла, и не требуют дополнительных пояснений.

Различия в величинах  $\tau_y$  и  $\tau_3$  в [3] связывают с временем формирования пламени со стационарными характеристиками. Измерения интенсивности излучения пламени над поверхностью образцов в данных опытах показали, что амплитуда выходного сигнала фотодиода в промежутке от  $\tau_3$  до  $\tau_y$  растет. Имеет тенденцию к увеличению и средняя скорость газификации (горения), измеренная по потере массы образцов за времена  $\tau_3 < \tau < \tau_y$ . При этом во всем диапазоне  $\tau$  она остается меньше средней скорости, определенной за время  $\tau \gg \tau_y$ . Полученные данные свидетельствуют как о применимости высказанных в [3] предположениях к нашим результатам, так и о том, что существенно нестационарные процессы в период переоблучения протекают в газовой и в конденсированной фазах.

Рост  $\tau_y$  с повышением  $q$  может быть связан с интенсификацией процессов испарения и диспергирования, приводящих к уменьшению суммарного выделения тепла в прогретом слое конденсированной фазы [4]. Возможность такого объяснения результатов подтверждается следующими фактами. Уротропин, использованный в качестве горючего, — термически нестойкое вещество. По данным дериватографического анализа, интенсивная потеря массы уротропина начинается при  $T = 430$  К. Наблюдения под микроскопом показали, что в смеси уротропина с ПХА при  $T = 440$  К образуется жидкая фаза. Жидкий слой отмечен и на поверхности нагреваемых образцов. Диспергирование с поверхности образцов при воздействии лучистого потока зафиксировано скоростной киносъемкой. При этом с повышением  $q$  процесс заметно интенсифицируется.

В [4] высказано предположение, что минимум на кривой  $\tau_y(q)$  может быть связан с экранированием теплового потока продуктами газификации при сильном теплоподводе. Однако прямые измерения показали, что ослабление лучистого потока в процессе зажигания на всех стадиях нагрева не превышает 10—15 % от падающего излучения.

Зависимость  $\tau_y(q)$ , полученная на образцах Б при  $q = 90 \div 130$  Вт/см<sup>2</sup>, насколько известно авторам, ранее не наблюдалась. Причины сложного поведения изученной системы в этом интервале потоков не установлены. Вероятно, здесь существенную роль играют скорости накопления тепла и выгорания прогретого слоя конденсированной фазы, определяющие суммарный запас тепла и распределение температуры в прогретом слое при различной длительности теплового импульса.

Влияние дисперсности ПХА на устойчивость зажигания, по-видимому, обусловлено более интенсивным протеканием реакций в конденсированной и газовой фазах вблизи поверхности в образцах с более мелким ПХА. По данным ДТА температура начала тепловыделения в образцах А ниже, а количество тепла, выделившегося на стадии низкотемпературного взаимодействия, несколько больше, чем в образцах Б. С другой стороны, на образцах А быстрее, чем на образцах Б, устанавливается постоянный уровень свечения пламени над поверхностью.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Христофоров А. В., Максимов Ю. Я., Илларионов А. Л. и др. // Физика горения и методы ее исследования.— Чебоксары, 1981.
2. Вилюнов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ.— Новосибирск: Наука, 1984.
3. De Luca L., Caveny L. H., Ohlemiller T. J. et al. AIAA J., 1976, 14, 7, 940.
4. Либрович В. Б. ПМТФ, 1963, 6, 74.

г. Томск

Поступила в редакцию 26/IX 1988

УДК 541.11

В. А. Калканов, А. А. Шавард

### УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТЬ СМЕСЕЙ МОНОСИЛАН — ВОЗДУХ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРЕ И ДАВЛЕНИИ

Моносилан широко применяется в современной технологии. Смеси  $\text{SiH}_4$  с кислородом и воздухом реагируют по разветвленно-цепному механизму и отличаются высокой воспламеняемостью. Для обеспечения безопасности эксплуатации промышленных установок необходимы как теоретические, так и экспериментальные исследования, достоверно характеризующие реакционную способность моносилана в смеси с воздухом, а также в условиях струйного истечения этого гидрида в атмосферу.

Имеющиеся в литературе данные о возможности составления (без воспламенения или взрыва), устойчивости (стабильности при хранении) и способности к воспламенению или самовоспламенению смесей  $\text{SiH}_4 + \text{воздух}$  недостаточны и противоречивы. Общие сведения и некоторые рекомендации содержатся в [1—3].

Реакционную способность горючего принято характеризовать положением границ области самовоспламенения и инициированного воспламенения в координатах давление  $p$  — температура  $T$ , а также концентрационными пределами. Воспламеняемость смесей  $\text{SiH}_4 + \text{O}_2$  можно оценить по результатам [4—7]. Наиболее подробно изучалась нижняя граница самовоспламенения [4—6]. Сопоставление данных по второму пределу выполнено в [7]. Определен богатый концентрационный предел (94 %  $\text{SiH}_4$  в  $\text{O}_2$ ) самовоспламенения, не расширяющийся при зажигании. Анализ результатов указанных работ позволяет сделать вывод о монотонном увеличении реакционной способности смесей  $\text{SiH}_4 + \text{O}_2$  при увеличении содержания гидрида. Тот факт, что при всех соотношениях этого состава при комнатной температуре верхняя граница области самовоспламенения проходит ниже атмосферного давления, указывает на возможность образования и существования несамовоспламеняющихся смесей моносилан + воздух практически любого состава при нормальных условиях ( $T = 293 \text{ K}$ ,  $p = 760 \text{ торр}$ ), поскольку присутствие азота снижает воспламеняемость гидрида [1—3].

Этот вывод, однако, ставят под сомнение результаты [8], где методом напуска  $\text{SiH}_4$  в сосуд, заполненный кислородом, разбавленным азотом, удалось составить в нормальных условиях лишь смеси, содержащие более 85 %  $\text{SiH}_4$ . Для меньших концентраций гидрида наблюдалось воспламенение в момент смешения исходных реагентов.

Обращает на себя внимание то, что для работ, посвященных изучению окисления моносилана, характерно особое внимание авторов к процедуре составления смесей. Например, в [4] разработан способ, при котором в колбу, содержащую 5—10 торр  $\text{O}_2$ , впускают некоторое количество  $\text{SiH}_4$ , затем добавляют  $\text{O}_2$  и вновь  $\text{SiH}_4$  и т. д., рассчитывая состав