

В. В. БАРЗЫКИН, У. И. ГОЛЬДШЛЕГЕР, А. Г. МЕРЖАНОВ

ЗАЖИГАНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ
ДИСПЕРСНЫМ ПОТОКОМ

(Представлено академиком Н. М. Эмануэлем 29 IX 1969)

Процесс зажигания конденсированных взрывчатых веществ конвективным газовым потоком изучался в работах (1, 2).

Настоящая работа поставлена с целью экспериментального исследования механизма зажигания конденсированных веществ дисперсным потоком (газ + твердые частицы) и выяснения количественных связей между характеристиками зажигания и параметрами потока.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Газ продувается через печь и попадает в коллектор. Частицы находятся в бункере и нагреваются до температуры газа. После выравнивания температур открывается заслонка и частицы поступают в коллектор, где смешиваются с газом. Из коллектора поток попадает

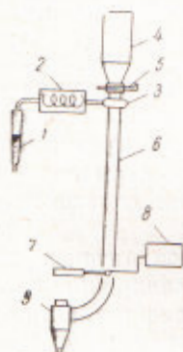


Рис. 1

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — ротаметр; 2 — печь; 3 — коллектор; 4 — питающий бункер; 5 — расходный шибер; 6 — рабочий канал; 7 — механизм ввода; 8 — осциллограф; 9 — циклон

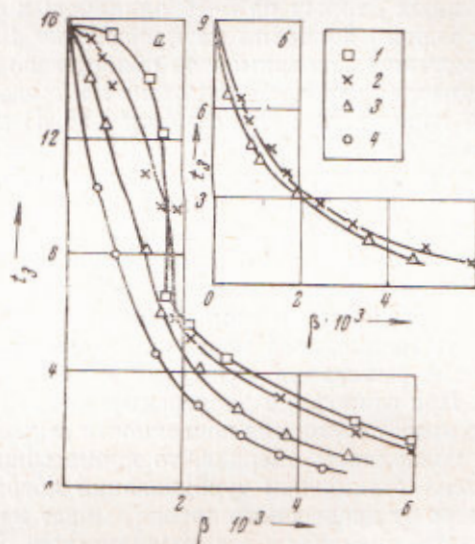


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость $t_3(\beta, d)$ для пироксиллина (а) и поливинилнитрата (б). 1 — $d = 380$; 2 — $d = 235$; 3 — $d = 130$; 4 — $d = 60$ μ

в цилиндрическую трубу, в которую с помощью специального устройства, обеспечивающего время ввода менее 0,1 сек., вводится образец исследуемого вещества. Рабочий канал и бункер теплоизолированы и снабжены обмоткой теплового экрана, предназначенной для ликвидации осевых и радиальных градиентов температур. Температура потока в канале и частиц в бункере измерялась хромель-копелевыми термопарами диаметром 0,1 мм, расход газа — ротаметром, расход частиц — весовым способом (3). Время задержки зажигания (t_3) определялось при помощи секундомера по моменту появления пламени и контролировалось термопарным измерением

температуры поверхности образца, моменту зажигания соответствует срыв кривой температура — время.

Объектом исследования были выбраны нитроклетчатка (пироксилин № 1) и поливинилнитрат, механизм воспламенения и свойства которых достаточно хорошо изучены. В работах (1, 4) показано, что воспламенение пироксилина и поливинилнитрата происходит в результате экзотермической реакции, протекающей в прогретом слое конденсированной фазы. Образцы изготовлялись в виде цилиндрических таблеток и вводились в рабочий канал на участке тепловой и гидродинамической стабилизации так, чтобы ось цилиндра была перпендикулярна набегающему потоку (поперечное обтекание). В качестве рабочей среды в опытах использовался воздух с находящимися в нем сферическими частицами алюмосиликата (инертное вещество, не оказывающее каталитического влияния на реакцию термического разложения исследуемых веществ; температура плавления более 1000° С).

Величины, характеризующие процесс, изменялись в следующих пределах: температура $T_0 = 250 \div 650^\circ \text{C}$; скорость газа $U = 1-3$ м/сек; диаметр частиц $d = 60, 130, 235, 380$ м; объемная расходная концентрация частиц в потоке $\beta = (0,5-6) \cdot 10^{-3}$. При этих значениях параметров определялась основная характеристика процесса — время задержки зажигания. Каждой точке графиков и таблиц соответствуют средние значения экспериментальных данных из 3-4 одинаковых опытов. Наибольшие отклонения от среднего значения не превышают 10%.

В результате экспериментов обнаружено существенное влияние основных параметров дисперсного потока на процесс зажигания. На рис. 2 представлены характерные зависимости $t_3(\beta, d)$ для нитроклетчатки и поливинилнитрата при $T_0 = 400^\circ$, $T_n = 20^\circ$ и $U = 2$ м/сек. Увеличение концентрации и уменьшение диаметра частиц приводит к существенному уменьшению времени задержки зажигания (максимальное уменьшение t_3 для нитроклетчатки в 15 раз, для поливинилнитрата — в 10 раз).

Анализ зависимостей t_3 от параметров дисперсного потока, визуальные наблюдения и киносъемка процесса зажигания, микроскопические исследования поверхностного слоя образцов, удаленных из потока в различные моменты индукционного периода, привели к следующим представлениям о механизме зажигания нелетучих конденсированных систем дисперсным потоком. При зажигании дисперсным потоком, в отличие от газового, важную роль играет состояние поверхности вещества.

Если поверхность твердая, то кроме общих факторов интенсификации теплообмена (таких как турбулизация пограничного слоя или лучистая теплоотдача от дисперсного потока) имеет место передача тепла при упругих столкновениях частиц с поверхностью. Интенсификация теплообмена между твердой поверхностью и потоком при введении в него частиц исследована в работе (5) и описана в критериальной форме:

$$\alpha_d / \alpha_r - 1 = 3,6 \cdot \beta^{1,38} (D/d)^{0,8} (T_0/T_n)^{3,8},$$

где α_d и $\alpha_r = 1,14\lambda(U/Dv)^{0,5}(v/a)^{0,37}$ (6) соответственно эффективные коэффициенты теплоотдачи в лобовой точке цилиндра при обтекании его дисперсным и чисто газовым потоком; D — диаметр образца; T_n — начальная температура; v — кинематическая вязкость; a — температуропроводность газа; λ — теплопроводность газа.

Если поверхность вещества размягчена (например, покрыта жидкой пленкой), то рассмотренный выше механизм передачи тепла становится неполным и надо учитывать новый фактор — внедрение частиц в поверхностный слой вещества и связанную с ним дополнительную интенсификацию теплообмена. Как показали специальные исследования, нитроклетчатка (при 165-175°) и поливинилнитрат (при 48-60°) размягчаются с образованием жидкой поверхностной пленки. При этом геометрическая форма и размеры образца к моменту зажигания практически не изме-

няются. Температура размягчения (T_*) может быть зафиксирована на кривой зависимости температуры поверхности образца в дисперсном потоке от времени в точке излома (рис. 3). Как показали измерения, T_* слабо зависит от условий нагрева и в первом приближении может служить константой вещества, характеризующей особенности закипания (теплообмена) дисперсным потоком. Внедрение частиц в поверхностный слой при размягчении установлено экспериментально путем микроскопического исследования образцов, удаленных из потока в различные моменты индукционного периода.

В зависимости от соотношения между температурой размягчения T_* и температурой закипания T_3 могут иметь место три качественно различных механизма закипания.

1. $T_* > T_3$ (внедрение частиц в поверхностный слой во время индукционного периода отсутствует). Для экспериментального исследования этого режима на поверхность образцов наклеивалась тонкая металлическая фольга толщиной $\approx 10 \mu$. Время задержки закипания бронированных образцов дисперсным потоком хорошо соответствует t_3 (см. рис. 4), для случая закипания вещества газовым потоком такой же интенсивности (зависимость от d и β здесь проявляется только через коэффициент теплообмена). Процесс закипания конденсированных веществ дисперсным потоком при этом не содержит в себе ничего принципиально нового и может быть рассчитан на основе существующей тепловой теории (7).

2. $T_* \lesssim T_3$ — модель нитроклетчатки. В этом случае внедрение частиц в поверхностный слой происходит в конечной стадии индукционного периода, при которой протекает химическая реакция уже существенно. Частицы, внедрившиеся в поверхностный слой, могут вызвать не только его дальнейший прогрев, но и привести к локальному (очаговому) воспламенению. Следует отметить, что в этом режиме процесс закипания дисперсным потоком при больших интенсивностях обусловлен чисто тепловыми факторами и t_3 примерно равно времени прогрева поверхности до температуры размягчения (табл. 1). На возможность очагового воспламенения указывает резкий срыв зависимости t_3 (рис. 2) в опытах с крупными частицами ($d = 235, 380 \mu$). Кроме того, визуальные наблюдения за характером воспламенения пироксилина показали, что при воспламенении наблюдаются отдельные вспышки, возникающие в различных частях на лобовой поверхности образца.

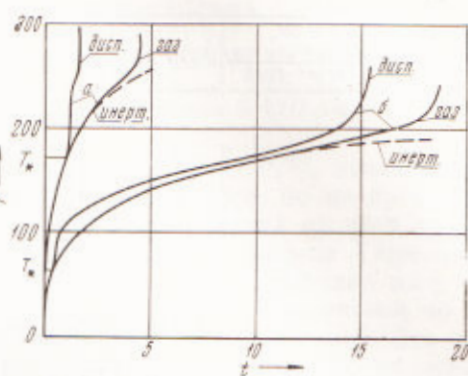


Рис. 3. Изменение температуры поверхности вещества во времени: а — пироксилин, $\alpha = 6 \cdot 10^{-3}$ кал/см²·сек·град; $T_0 = 400^\circ$; $T_n = 20^\circ$ С; б — поливинилнитрат, $\alpha = 3,5 \cdot 10^{-3}$ кал/см²·сек·град; $T_0 = 270^\circ$; $T_n = 20^\circ$. Пунктирные кривые соответствуют случаю нагрева инертного вещества (8)

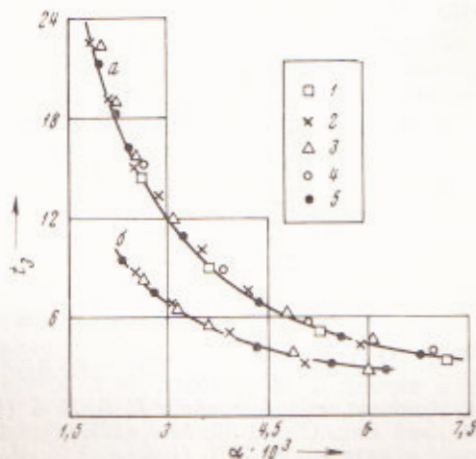


Рис. 4. Зависимость $t_3(\alpha)$ для пироксилина (а) и поливинилнитрата (б): 1 — $d = 380$; 2 — $d = 235$; 3 — $d = 130$; 4 — $d = 60 \mu$; 5 — чистый газ

3. $T_* \ll T_3$ — модель поливинилнитрат. В случае низкой температуры размягчения смена механизма теплообмена происходит на ранней стадии процесса, и большую часть индукционного периода вещество прогревается через тонкий слой частиц на поверхности, имеющих в момент прилипания температуру потока. Временем образования этого слоя можно прене-

Таблица 1

$\alpha \cdot 10^3$, кал см ² сек ⁻¹ град	d , μ	Т-ра, °С	t_3 дисп.	t_{170} инерт.	t_3 газ.
Нитроклетчатка					
6	380	400	1,4	1,05	4,4
	235		1,5		
	130		1,7		
	60		1,9		
	235	450	1,2	0,8	3,8
		520	0,78	0,52	2,42
		640	0,47	0,31	1,46
Поливинилнитрат					
2	130	270	33,1	—	36,2
	235		30,8	—	
4	130	270	12,7	—	14,9
	235		11,6	—	

бречь (специальные эксперименты и расчет показали, что время заполнения поверхности образца значительно меньше времени индукции от момента размягчения до момента зажигания). В этом режиме интенсификация зажигания за счет внедрения частиц в поверхностный слой невелика и t_3 в дисперсном и газовом потоках при слабых интенсивностях близки (табл. 1).

Сформулированные представления о механизме зажигания дисперсным потоком могут быть математически смоделированы как кондуктивный нагрев вещества накаливаемой пластиной конечной толщины с конвективным потоком на внешней поверхности пластины.

Авторы благодарны А. А. Разиной за помощь в проведении эксперимента.

Институт химической физики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
29 IX 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Ю. М. Григорьев, В. И. Лисицкий, А. Г. Мержанов, Физика горения и взрыва, 3, № 4 (1967). ² J. A. Keller, A. D. Baer, N. W. Ryan, Am. Inst. Aeronaut. and Astronomy J., 8, № 4 (1966). ³ L. Farbar, M. Morley, Industr. and Eng. Chem., 49, № 7 (1957). ⁴ Г. Б. Манелис, Ю. И. Рубцов, Кинетика и катализ, 3, № 1 (1962). ⁵ У. И. Гольдшлегер, В. В. Барзыкин, Изв. физич. журн., 17, № 2 (1970). ⁶ Г. Гребер, С. Эрк, У. Григуль, Основы учения о теплообмене, ИЛ, 1958. ⁷ А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов, ДАН, 178, № 1 (1968). ⁸ А. В. Лыков, Теория теплопроводности, М., 1967.