

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА КИСЛОРОДНЫЙ ИНДЕКС ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Ф. Жевлаков, Б. П. Кондриков, И. А. Болодьян
(Балашиха)

Изучение способности полимеров к горению при различных скоростях газового потока (u) представляет интерес как для практических целей, так и для выяснения механизма горения. Данные по влиянию скорости газового потока на кислородный индекс полимеров приведены в работах [1, 2]. Однако получены они при скорости потока, не превышающей 1 м/с. При более высоких значениях u изучалось только горение полиметилметакрилата [3].

В данной работе опыты проводили при скорости газового потока до 6 м/с. Изучались полиметилметакрилат (ПММА), фторопласт-4 (тефлон), стеклотекстолит (70% стеклоткани, 30% эпоксифенольного связующего), а также ткани лола (масса на единицу поверхности 216 г/м²) и внивлон-М (160 г/м²). Эти материалы отличались по характеру горения и по способности к нему. Первые три вещества горят с образованием газофазного пламени. При горении тканей лола и внивлон-М пламя практически отсутствует, зона реакции имеет вид тлеющей плоскости. Кислородный индекс ПММА 0,17, тефлона 0,95, гетерогенно горящих тканей 0,5—0,6.

Из самых общих соображений непосредственно практического опыта следует, что поток воздуха с небольшой скоростью «раздувает» беспламенно горящий материал, горение его интенсифицируется, тогда как газовое пламя в этих условиях затухает. Для уточнения этих соотношений, придания им количественного характера, необходим эксперимент в контролируемых условиях.

Опыты проводили в вертикальной трубе из кварцевого стекла диаметром 1,9; 2,5 или 7 см, в которой в направлении снизу вверх создавали поток кислородно-азотной смеси известного состава. Расход компонентов газовой смеси измеряли и регулировали с помощью калиброванного сопла. Однородность потока по сечению достигалась набивкой нижней части трубы стеклянными шариками. Опыты показали, что при одинаковой скорости потока предельное для горения материалов содержание кислорода, определенное в трубах различного диаметра, было одинаковым.

Образцы для проведения испытаний из ПММА, тефлона и стеклопластика представляли собой стержни сечением 2×3 мм, длиной 150—200 мм, закреплявшиеся в верхней части при поджигании снизу и в нижней — при горении сверху вниз. Ткани лола и внивлон-М испытывали в виде полоски шириной 19 и длиной 150 мм. Для закрепления полоски использовалась рамка из проволоки толщиной 0,5 мм. В изученном диапазоне изменения скорости потока турбулизации фронта пламени не происходило.

При проведении опытов вначале устанавливали в трубе такой поток смеси кислорода с азотом, чтобы горение материала происходило устойчиво. По мере сгорания образца расход кислорода в газовом потоке оставался постоянным, а расход азота плавно увеличивали до тех пор, пока не происходило затухание образца. Далее рассчитывали соответствующие этому моменту значения скорости потока и содержания в нем кислорода U_* . При увеличении содержания азота в потоке газофазное пламя «расширялось», диаметр факела несколько увеличивался. В случае ПММА и стеклотекстолита при содержании кислорода, близком к критическому, пламя проходило по стержню снизу вверх, а затем возвращалось, наблюдалось несколько пульсаций, и горение затухало.

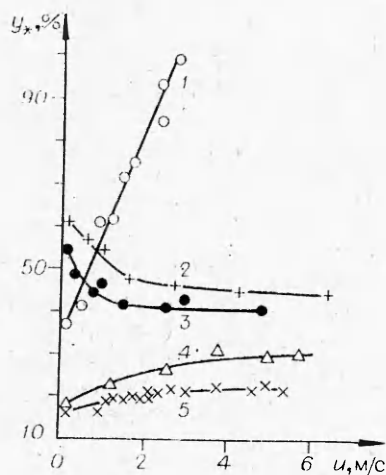


Рис. 1. Влияние скорости газового потока на кислородный индекс полимеров (распространение пламени снизу вверх).
1 — тefлон; 2 — винилон-М; 3 — лoла; 4 — стеклотекстолит; 5 — ПММА.

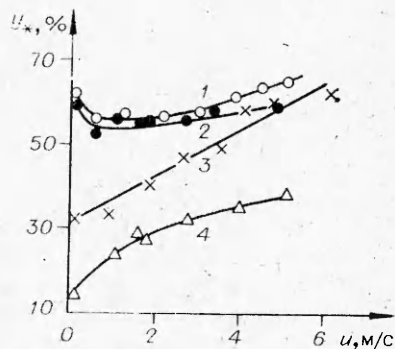


Рис. 2. Влияние скорости газового потока на кислородный индекс полимеров (распространение пламени сверху вниз).
1 — лoла; 2 — винилон-М; 3 — стеклотекстолит; 4 — ПММА.

При горении стержней из тefлона и ПММА в направлении снизу вверх отмечалось любопытное явление. При скорости потока газа, большей 0,5 м/с, передняя кромка пламени устанавливалась на расстоянии 7—12 мм от нижнего края стержня. После перегорания стержня на уровне передней кромки пламя перемещалось вверх и вновь стабилизировалось на таком же расстоянии от конца образца.

При горении ПММА в направлении сверху вниз, начиная с некоторой скорости потока, пламя прекращало распространяться по поверхности. Фронт выгорания из конического превращался в плоский. Горение в этом случае стабилизировалось в результате образования у верхнего торца застойной зоны. В данной работе при горении ПММА в направлении сверху вниз за значение y_* принимали концентрацию кислорода, при которой прекращалось распространение пламени по поверхности.

Результаты измерений приведены на рис. 1—3. Предельная концентрация кислорода в смеси с азотом дана в объемных долях.

При распространении пламени снизу вверх в направлении, совпадающем с направлением потока газа (см. рис. 1), предельное содержание кислорода y_* в случае газофазно горящих полимеров по мере роста скорости потока непрерывно увеличивается. Темп роста величины y_* для тefлона гораздо больше, чем для ПММА и стеклотекстолита. Производная $y_*' = dy_*/du$ в первом случае равна 0,24 с/м и постоянна вплоть до $u = 3$ м/с. При этом значении скорости $y_* = 1$ (при $u > 3$ м/с тefлон не горит). В случае ПММА и стеклотекстолита при $u \rightarrow 0$ (при этом скорость потока в зоне горения определяется скоростью естественной конвекции) $y_*' = 0,04 \div 0,05$ с/м, по мере роста скорости потока y_* умень-

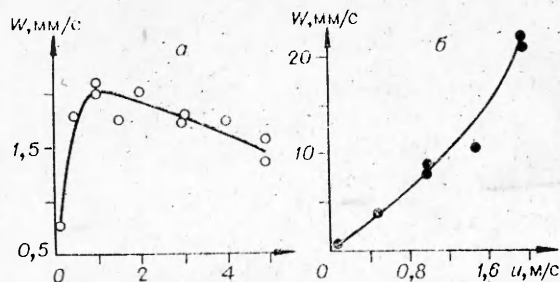


Рис. 3. Влияние газового потока на скорость распространения пламени по ткани лoла сверху вниз (а) и снизу вверх (б).

шается. При горении тканей y_* при увеличении скорости потока снижается, вначале быстро, а затем более медленно ($y'_* < 0$).

В условиях распространения пламени сверху вниз при повышенных скоростях газового потока тефлон практически не способен к горению. Горение стеклотекстолита и тефлона сверху вниз (см. рис. 2) требует большего содержания кислорода, чем горение снизу вверх. В первом случае в оптимальных для горения газодинамических условиях ($u \rightarrow 0$) $y_* = 0,32$ вместо 0,17, во втором — 0,95 вместо 0,37. Увеличивается и угнетающее влияние скорости потока: для ПММА y'_* при $u \rightarrow 0$ растет от 0,04 до 0,01 с/м. Для стеклотекстолита y'_* при $u \rightarrow 0$ не меняется при изменении направления распространения пламени и составляет 0,05 с/м. При увеличении u величина y_* для этого материала не уменьшается, как при горении снизу вверх, а остается постоянной.

Заметно затрудняется и горение тканей дола и винилон-М: снижение y_* при увеличении скорости потока более слабое, чем при горении снизу вверх и уже при $u \approx 1$ м/с сменяется хотя и не сильным, но заметным ростом $y_*(u)$. Минимум на кривой $y_*(u)$ (см. рис. 2, 1) соответствует максимуму на кривой $W(u)$ (см. рис. 3, а). При горении снизу вверх кривые $y_*(u)$ (см. рис. 1, 3) и $W(u)$ (см. рис. 3, б) экстремумов не имеют.

Причины наблюдаемых различий во влиянии потока газа и направления распространения пламени на величину y_* качественно понятны. Активная, определяющая горение часть газофазного пламени обычно стабилизирована по кислороду. Вдув в нее холодного газа приводит, в основном, к разбавлению, снижению температуры пламени и, следовательно, к росту y_* . Гетерогенное горение, напротив, обычно идет в условиях недостатка окислителя, поэтому при подаче в зону сгорания кислородсодержащего газа и уменьшения толщины пограничного слоя гетерогенные реакции интенсифицируются. Предельное содержание кислорода в газе при этом может быть уменьшено. Если принять во внимание, что гетерогенное горение углеродистых материалов обычно сопровождается образованием газофазного пламени ($2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$), которое доставляет некоторое количество тепла горящему веществу, то можно объяснить и наличие минимума на кривой $y_*(u)$ при горении тканей сверху вниз в условиях, когда роль газофазного пламени повышается (см. рис. 2, 1, 2).

Теоретическое описание зависимости $y_*(u)$ для газофазного горения дано в [4, 5]. Приведенная в [4] величина $y_*(u)$ для ПММА, рассчитанная по формуле (3) из [4], близка к полученной нами экспериментально (см. рис. 2, 4).

Для гетерогенного горения на пределе горючести из условия баланса тепла получается соотношение

$$\frac{y_*}{y_{*1}} = \frac{1 - a\delta}{1 + a\delta_1}, \quad a = \sigma T_r^4 [(T_r - T_0)(1 + \rho_0/\rho) \cdot \lambda]^{-1}.$$

Здесь $\delta \approx u^{-n}$ — толщина пограничного (теплого и диффузионного) слоя; σ — постоянная Стефана — Больцмана; T_r — температура горячей поверхности; ρ , λ — плотность и коэффициент теплопроводности газа в пограничном слое. Индекс 0 относится к холодному газу, индекс 1 — к некоторой произвольной точке на экспериментальной кривой $y_*(u)$. Хорошее согласие между расчетом по формуле и опытом (см. рис. 1, 2, 3) получается при $n = 1/4$. При этом $a\delta_1 \approx 1$. Отметим, что при обтекании инертной негорящей пластины ламинарным потоком получается несколько более сильная зависимость толщины ламинарного пограничного слоя от скорости потока ($n = 1/2$).

Таким образом, эксперименты показали, что минимальная концентрация кислорода в газовом потоке, при которой возможно самостоятельное горение полимеров, существенно зависит от скорости газового пото-

ка. Характер этой зависимости для газофазно и гетерогенно горящих материалов различный, причем для последнего типа материалов он зависит также от направления распространения по образцу пламени по отношению к направлению потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Б. Серков, И. М. Абдурагимов, В. М. Савин и др.— В кн.: Процессы горения и проблемы тушения пожаров/Под ред. И. В. Рябова. Ч. 1. М.: ВНИИПО МВД СССР, 1973.
2. А. С. Мелихов, И. А. Болодьян, В. В. Синельщикова и др.— В кн.: Пожарная профилактика. Вып. 9. М.: Стройиздат, 1974.
3. L. Krishnamurthy. Comb. Sci. Techn., 1975, 10, 1.
4. А. Д. Марголин, В. Г. Круткин. Докл. АН СССР, 1981, 257, 6, 1369.
5. С. С. Рыбанин. Докл. АН СССР, 1982, 266, 4, 915.

УДК 614.841.413

ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В СВОБОДНЫХ ОБЪЕМАХ

*В. И. Макеев, Ю. А. Гостинцев, В. В. Строгонов,
Ю. А. Бохон, Ю. Н. Чернушкин, В. Н. Куликов*

(Балашиха)

Исследованию процессов горения и детонации газовых смесей в свободных объемах посвящен ряд работ. Отмечается, что при иницировании воздушных смесей слабым источником (искра, пережигаемая проволока) переход медленного горения в детонацию невозможен, при жестком источнике (заряд ВВ) такой переход наблюдается [1—3]. Вывод о невозможности перехода медленного горения в сферическую детонацию делается на основании экспериментов с небольшими объемами и противоречит теоретическим представлениям [4], согласно которым неустойчивость и ускорение сферического фронта пламени могут приводить к возникновению детонации. Сведения по критическим энергиям иницирования сферической детонации, параметрам взрывных волн и возможности моделирования газового взрыва тротильным зарядом также противоречивы [2, 3].

Цель работы — экспериментальное исследование режимов горения и перехода в детонацию водородно-воздушных смесей в свободных объемах ($V_0 \leq 86 \text{ м}^3$) при слабом и жестком иницировании горения.

Исходная газовая смесь готовилась непосредственно в тонких резиновых оболочках. Объемная концентрация H_2 в смеси варьировалась в пределах 13—66% при относительной точности $\pm 2,5\%$. Горение иницировалось в центре объема искрой с энергией ~ 1 Дж для смесей объемом 35 и 86 м^3 и зарядом тринитротолуола (ТНТ) массой 0,3—190 г для смесей объемом до 6 м^3 . Максимальное давление по взрывной волне Δp измерялось импульсными пьезодатчиками, видимая скорость горения w — с помощью скоростной съемки и прямой развертки пламени. Калибровка проводилась зарядами ТНТ.

На рис. 1 показаны типичные зависимости радиуса пламени r и w от времени для объемов 32 и 82 м^3 при концентрации водорода $c = 34—35\%$. Опыты показали, что при $V_0 = 32 \div 35 \text{ м}^3$ ускорение фронта пламени, приобретенное на начальном участке, прекращалось, затем фронт горения распространялся с постоянной скоростью ~ 38 м/с. При $V_0 = 82 \div 86 \text{ м}^3$ скорость фронта пламени непрерывно возрастала и к концу горения составила 105 м/с (при концентрации 35%).

Зависимость максимальной величины видимой скорости горения w_{max} от состава смеси представлена на рис. 2. Видно, что наибольшее значение w_{max} достигается при концентрации $\sim 35\%$. С увеличением объема максимальное значение видимой скорости горения возрастает.