

Проведенный эксперимент показал, что вероятность зажигания зависит от энергии инициирующего импульса, причем зависимость можно описать интегральной кривой Гаусса. Предположительно такую зависимость можно связать со следующими причинами: неоднородность свойств мишени, возникающая в результате прессования; кинетические затруднения реакции при переходе из жидкого очага [1] в зону горения (с участием твердой фазы); разрыв сплошности среды, который может возникнуть в мишени за счет термических напряжений. Полученные результаты позволяют подобрать соответствующую теоретическую модель процесса зажигания.

Авторы выражают благодарность А. Н. Корнилову за полезное обсуждение и помощь в статистической обработке результатов.

Поступила в редакцию  
9/VII 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. И. Короткевич, Г. В. Хильченко и др. ФГВ, 1981, 17, 5.
2. Б. Л. Ван дер Варден. Математическая статистика. М.: ИЛ, 1960.
3. И. П. Ашмарин, Н. Н. Васильев, В. А. Амбросов. Быстрые методы статической обработки и планирования экспериментов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1971.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ ТРОЙНЫХ СМЕСЕЙ ГОРЮЧЕЕ — ВОЗДУХ — РАЗБАВИТЕЛЬ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ ФЛЕГМАТИЗАЦИИ

*Ю. Н. Шебеко, А. Я. Корольченко, А. В. Иванов  
(Балашиха)*

Зависимость концентрационных пределов распространения пламени от содержания разбавителя в горючей смеси представляет собой характерную кривую, ограничивающую некоторую область, называемую областью воспламенения [1]. Точка, в которой смыкаются верхняя и нижняя ветви кривой флегматизации, называется точкой флегматизации. За исключением некоторых веществ (например, водорода, метана), точка флегматизации для большинства органических соединений соответствует богатым смесям. Насколько известно авторам, детального объяснения этого эффекта не найдено.

Исследования закономерностей горения тройных смесей горючее — воздух — разбавитель в окрестности точки флегматизации проведены в [2, 3]. В работе [2] найдено, что при разбавлении горючих смесей органических веществ азотом, двуокисью углерода и водяным паром адиабатическая температура горения в точках флегматизации приблизительно постоянна и  $\approx 1400$ — $1450$  К. Важная закономерность обнаружена в работе [3], где показано, что для тройных смесей *n*-алканы (*n*-спирты) — воздух — азот точкам флегматизации приблизительно соответствуют смеси, стехиометрические по отношению к сгоранию до CO и H<sub>2</sub>O, а величина адиабатической температуры горения  $T_{ад}^{CO}$  при сгорании до CO и H<sub>2</sub>O в этих точках заключена в пределах 1300—1400 К.

Настоящая работа посвящена проверке закономерностей, найденных в [3], для более широкого круга органических горючих веществ и флегматизаторов. Концентрация горючего в смеси, стехиометрической по

отношению к сгоранию до  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , связана с концентрацией разбавителя в смеси соотношением

$$\varphi_r = \frac{100 - \varphi_\phi}{1 + 4,84\beta}, \quad (1)$$

где  $\varphi_r$ ,  $\varphi_\phi$  — объемные концентрации горючего и разбавителя, %;  $\beta = 0,5n_C + 0,25n_H - 0,5n_O$  — стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания до  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ;  $n_C$ ,  $n_H$ ,  $n_O$  — число атомов С, Н, О в молекуле горючего. Выражение (1) получено из условия стехиометрии горючей смеси по отношению к сгоранию до  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

Для проверки соотношения (1) проведен расчет  $\varphi_r$  с использованием экспериментальных значений  $\varphi_\phi$  из работы [4] для 21 органического вещества и двух химических инертных разбавителей (азота и двуокиси углерода). Результаты сопоставлены с экспериментом. Оказалось, что относительное среднеквадратичное отклонение расчетных значений  $\varphi_r$  от экспериментальных составляет 13%.

На рис. 1 приведена зависимость величины  $y = \varphi_r(1 + 4,84\beta)$  от  $\varphi_\phi$  для точек флегматизации при разбавлении смесей *n*-алканов, *n*-алкенов и *n*-спиртов с воздухом, азотом и двуокисью углерода ( $\varphi_r$ ,  $\varphi_\phi$  — экспериментальные величины из работы [4]). Видно, что экспериментальные значения  $y$  достаточно близки к расчетным, хотя, как правило, несколько ниже их.

На рис. 2 приведены кривые флегматизации пропана разбавителями, а также график зависимости (1). Видно, что точки флегматизации лежат близко к прямой (1). По экспериментальным значениям  $\varphi_r$  и  $\varphi_\phi$  из работы [4] проведен расчет  $T_{\text{ад}}^{\text{CO}}$  для упомянутых выше точек флегматизации ( $T_{\text{ад}}^{\text{CO}} = 1310 \pm 90 \text{ K}$ , в качестве величины разброса взято среднеквадратичное отклонение).

Возможность расчета концентрации горючего по известной концентрации разбавителя в точке флегматизации с помощью соотношения (1) проверена также на примере галоидсодержащих соединений, которые в ряде случаев могут обладать ингибирующим действием. Результаты расчета  $\varphi_r$  по формуле (1) приведены в таблице. Относительное среднеквадратичное отклонение расчетных значений  $\varphi_r$  от экспериментальных составляет 16%, т. е. и в случае флегматизации органических горючих

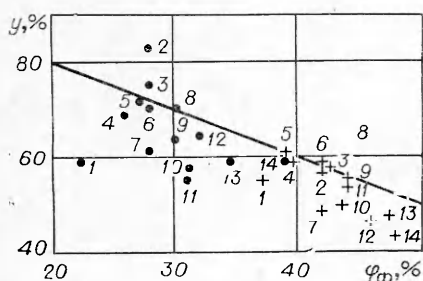


Рис. 1. Зависимость  $y$  от  $\varphi_\phi$ , линия —  $y = 100 \varphi_\phi$ .

+ — флегматизация азотом; ○ — флегматизация двуокисью углерода. 1 — метан; 2 — пентан; 3 — гексан; 4 — изобутилен; 5 — бутан; 6 — пропан; 7 — пропилен; 8 — 3-триметилбутен-1; 9 — бутен-1; 10 — этан; 11 — этанол; 12 — метанол; 13 — бутадиев; 14 — этилен.

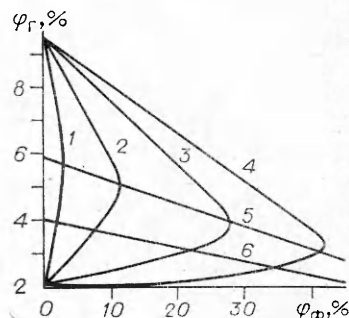


Рис. 2. Кривые флегматизации пропана азотом (4) [4], двуокисью углерода (3) [4], 1,1,2-трифтортрихлорэтаном (2) [5], 1,1,2-дибромтетрафторэтаном (1) [5], а также зависимости стехиометрических (по отношению к сгоранию до  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  соответственно) концентраций горючего от концентрации разбавителя (5, 6).

Экспериментальные и расчетные значения концентраций горючего в точках флегматизации

Горючее	Флегматизатор	Эксперимент		$\varphi_{Г}, \%$ (расчет)	Литература
		$\varphi_{Г}, \%$	$\varphi_{Г}, \%$		
Пропан	Дифторхлорметан	3,9	17,0	4,6	[5]
Пропан	1, 1, 2-Трифтортрихлорэтан	5,2	11,3	4,9	
Пропан	Фтортрихлорметан	6,5	14,7	4,8	
Пропан	1,2-Дибромтетрафторэтан	5,8	3,05	5,4	
n-Бутан	1, 2-Дибромтетрафторэтан	4,6	3,2	4,3	
Изобутан	1, 1, 2,-Трифтортрихлорэтан	4,0	9,9	4,0	
Изобутан	Шестифтористая сера	4,5	13,8	3,8	
Изобутан	1, 2-Дибромтетрафторэтан	4,5	3,0	4,3	
Изобутан	Дифторхлорметан	3,0	16,0	3,7	
Пентан	Шестифтористая сера	3,4	16,0	3,0	[4]
Пентан	Четыреххлористый углерод	3,0	22,0	2,8	
Этиловый спирт	Дифтордихлорметан	5,2	17,0	7,7	

галоидсодержащими разбавителями точкам флегматизации также приближенно соответствуют смеси, стехиометрические по отношению к сгоранию до CO и H<sub>2</sub>O.

Отмеченная выше закономерность связана, по-видимому, с двухстадийным характером горения органических соединений в воздухе. Известно, что в первой стадии горения органических веществ исходное горючее окисляется до CO и H<sub>2</sub>O в предпламенной зоне, во второй стадии CO догорает в зоне реакции до CO<sub>2</sub> [6]. Как показано в работах [7, 8], именно закономерности протекания второй стадии (скорости тепловыделения и теплоотвода) определяют величины пределов распространения пламени. Вероятно, для смесей, стехиометрических относительно сгорания до CO и H<sub>2</sub>O, реализуется максимальная скорость тепловыделения во второй стадии горения. Однако более детально этот вопрос может быть выяснен после подробного анализа кинетики химических реакций в зоне горения фронта пламени.

В связи с этим представляется необходимым отметить, что исследованная в настоящей работе закономерность может быть распространена лишь на те органические вещества, для которых справедливо предположение о двухстадийном характере горения. К числу таких соединений можно отнести алканы, олефины, спирты, ароматические соединения, сложные эфиры и, вероятно, некоторые другие классы органических веществ.

Таким образом, в настоящей работе показано, что точкам флегматизации при разбавлении горючих смесей органических веществ с воздухом инертными разбавителями, а также галоидсодержащими соединениями соответствуют смеси, стехиометрические относительно сгорания до CO и H<sub>2</sub>O.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность В. В. Азатяну, В. Т. Монахову и А. И. Розловскому за участие в обсуждении результатов работы.

Поступила в редакцию  
13/VIII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. H. F. Coward, G. W., Jones. Bull. 503. Bureau of Mines, Washington, 1952.
2. В. Т. Монахов. Методы исследования пожарной опасности веществ. М.: Химия, 1979.
3. А. Маček. Comb. Sci. Techn., 1979, 21, 43.
4. M. G. Zabetakis. Bull. 627. Bureau of Mines. Washington, 1965.

5. Б. С. Ермаков, В. Т. Монахов.— В сб.: Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Вып. 2. М.: ВНИИПО, 1979.
6. А. С. Соколик. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
7. А. И. Розловский, Б. Б. Брандт. Докл. АН СССР 1962, 145, 6.
8. А. С. Мальцева, А. И. Розловский, Ю. Е. Фролов. ЖВХО им. Д. И. Менделеева, 1974, 19, 5.

## О ВЛИЯНИИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ГОРЕНИЯ НА АЭРОДИНАМИКУ ТУРБУЛЕНТНОГО ВОДОРОДНОГО ФАКЕЛА

Ю. М. Аннушкин, Е. Д. Свердлов  
(Москва)

При расчетах аэродинамики диффузионного факела широко используется метод интегральных соотношений теории турбулентных струй [1—3]. При этом предполагается, что процесс горения не оказывает влияния на аэродинамику струи. Так, при анализе затопленных факелов принимается предположение В. С. Авдеевского [2] о том, что границы турбулентной струи с горением прямолинейны и не отличаются от границ струи несжимаемой жидкости. Расчеты с использованием этого предположения показывают, что смешение и, в частности, относительная длина пламени не должна зависеть от скорости истечения газообразного топлива ( $w_a$ ) и размера сопла ( $d_a$ ). При горении углеводородных топлив типа метана, пропана в случае малых скоростей истечения из сопла (из-за ограничений по срыву пламени) или при горении низкокалорийных топлив за соплами относительно больших размеров (например, ракетные двигатели) это предположение хорошо подтверждается опытом [4].

Однако для широкого круга задач, связанных с горением газообразного водорода, истекающего из сопел малого размера ( $d_a = 0,5 \div 3$  мм), указанное выше предположение оказывается несправедливым. Так, изменение режима горения ( $w_a$ ,  $d_a$ ) приводит к существенному изменению закономерностей смешения [5—9]. Вопрос о влиянии теплового режима горения, истечения топлива и размеров сопел на аэродинамику водородного факела потребовал специальных исследований, излагаемых ниже.

Соотношения, получаемые из интегральных уравнений сохранения массы и количества движения струи, распространяющейся в неподвижном окислителе, при задании приближенных профилей  $c/c_m$  и  $w/w_m$  можно записать в виде

$$c_m \approx \frac{k_0}{\sqrt{\rho_a}} \cdot \frac{\sqrt{\bar{T}_{\max}}}{R_x^0}, \quad (1)$$

$$\bar{w}_m \approx 1,1c_m, \quad (2)$$

$$R_x^0 = 1 + \varphi x^0 \quad (\varphi = f(Q_{Vx})), \quad (3)$$

$$c \approx c_m [1 - (r^0/R_x^0)^{3/2}]^{3/2}, \quad (4)$$

$$w \approx w_m [1 - (r^0/R_x^0)^{3/2}]^2. \quad (5)$$

Здесь  $k_0 \approx 7$  — коэффициент, определяемый из эксперимента (один и тот же для негорящей и горящей струй);  $\rho_a = \rho_n/\rho_a = R_a T_a/R_n T_n$  — от-