

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГЕТЕРОГЕННОГО  
ИНГИБИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ  
В ГОРЮЧИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ

Յ. Գ. ԴՅՕՇԵՆԻԴՅԷ, Դ. Ն. ԼՕՐԴԿԻՍԱՆԻԴՅԷ,  
Գ. Տ. ԲԵԶԱՐԱՇՎԻԼԻ և Մ. Դ. ՄՍԵՐԻԴՅԷ

Кафедра химической кинетики  
Тбилисского государственного университета им. И.Джавахишвили  
Тбилиси, Республика Грузия

Поступило 7 VII 1998

Методом вертикальной трубы экспериментально изучено ингибирующее влияние порошков различных неорганических солей на распространение пламени в водород-воздушных и этан-воздушной смесях атмосферного давления. Выявлены различные вклады термических и химических гетерогенных факторов в суммарный процесс подавления горения исследуемых смесей твердыми частицами порошков. Полученные данные сопоставляются с результатами математического моделирования ингибированного пламени водорода, проведенного с использованием ЭВМ.

Рис. 8, табл. 1, библиографических ссылок 21.

## Введение

Исследование воздействия ингибиторов различных типов на процессы воспламенения на сегодняшний день остается актуальной научной задачей. Определение предельных концентраций ингибирующих добавок в зоне реакции, изучение зависимости этих концентраций от характеристических параметров горючей смеси и химической природы самого ингибитора

ра, исследование влияния ингибирующих агентов на скорость горения могут дать ценную информацию о закономерностях процессов воспламенения и их ингибирования.

К числу активных ингибирующих добавок можно отнести порошки ряда неорганических солей, на основе которых изготавливаются высокоэффективные огнегасящие составы. Детальный механизм ингибирования реакций горения частицами порошков различного состава все еще остается недостаточно изученным, хотя выяснению этого вопроса посвящены многие научные исследования [1-15]). В целом можно резюмировать, что воздействие частиц порошков на распространение пламени можно объяснить механизмами "термического" или химического ингибирования [6]. В свою очередь химическое ингибирование может осуществляться гетерогенно (т.е. гетерогенной гибелью ведущих активных центров реакции горения на поверхности твердых частиц) или гомогенно (путем возгонки частиц и увеличения скорости гибели активных центров реакции в газовой фазе). Кроме того установлено, что частицы порошков могут вызвать турбулизацию газового потока перед фронтом пламени [12], что весьма усложняет общую картину исследуемого процесса.

Настоящая работа посвящена изучению механизмов ингибирования распространения пламени в водород-воздушных и стехиометрической этан-воздушной смеси атмосферного давления (и начальной комнатной температуры) порошками некоторых неорганических солей. Был использован метод "вертикальной трубы", который в некоторых опытах сочетался с видеосъемкой процесса. Для теоретической интерпретации полученных данных был применен также метод математического моделирования ингибированного пламени с помощью ЭВМ.

## Методика эксперимента

Опыты проводились в вертикальных цилиндрических реакторах, распространение пламени в которых регистрировалось с помощью чувствительных фотоэлементов. В реакторах по парциальным давлениям приготавливались реакционные смеси " $C_2H_6 + \text{воздух}$ " и " $H_2 + \text{воздух}$ " различного состава. Сум-

марные давления смесей составляли 1 атм. С верхней части реактора с помощью специального бункера подавались частицы исследуемых порошков, а смесь поджигалась у нижней части, которая перед каждым опытом открывалась для поддержания постоянного давления. Методом взвешивания определялась предельная концентрация твердых частиц  $W_c$  ( $кг/м^3$ ) в объеме реактора, достаточная для подавления распространения пламени снизу вверх. Относительная погрешность при определении  $W_c$  составляла  $10+15\%$ .

Вышеуказанные фотоэлементы были присоединены к специальному осциллографу, показания которого давали возможность определять также и видимую скорость перемещения фронта пламени в реакторе.

В качестве ингибирующих добавок использовались  $Na_2SO_4$  (безводная соль),  $NaF$ ,  $NaHCO_3$  и  $CaCO_3$ . Частицы этих порошков измельчались, а затем отсеивались через стандартные сита для получения отдельных фракций с различной дисперсностью порошков. После высушивания определялась удельная поверхность твердых частиц —  $S$  ( $м^2/кг$ ) методом воздухопроницаемости слоя порошка. Относительная погрешность в определении  $S$  составляла около  $5\%$ .

## Результаты и их обсуждение

В первую очередь было изучено гетерогенное ингибирование распространения пламени в бедных водород-воздушных смесях, в которых процентное содержание водорода составляло 10, 12 и 14%. Эксперимент проводился в реакторе с внутренним диаметром 35 мм и высотой 800 мм. Результаты опытов представлены на рис.1. Видно, что увеличение удельной поверхности твердых частиц приводит к резкому уменьшению их предельной концентрации в реакторе.

Для выяснения вопроса о том, через какой канал осуществляется ингибирование пламени в условиях данного эксперимента — гомогенный или гетерогенный, необходимо оценить максимальный разогрев твердых частиц в зоне горения. Согласно [5], при прохождении через ламинарное пламя изменение температуры твердой частицы ( $\theta$ ) можно описать следующим уравнением:

$$\frac{d\theta}{dx} \approx \frac{12\lambda}{V_s(C_p\rho)_s d^2} (T - \theta). \quad (1)$$

Здесь  $x$  — координата по нормали к фронту пламени,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности газовой среды,  $T$  — температура газа,  $V_s$  — скорость передвижения твердой частицы относительно фронта пламени,  $(C_p \rho)_s$  — "объемная" теплоемкость твердой фазы,  $d$  — диаметр частицы.

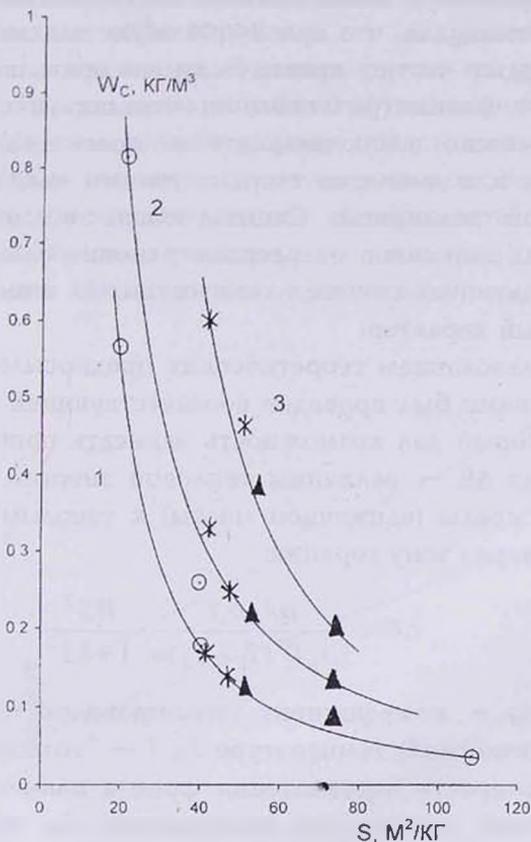


Рис. 1. Зависимость предельной массовой концентрации порошков  $Na_2SO_4$  (O),  $NaF$  (Δ) и  $CaCO_3$  (\*) от удельной поверхности частиц при различных содержаниях  $H_2$  в исходной смеси с воздухом: 1 — 10%; 2 — 12%; 3 — 14%.

Изменение параметра  $V_s$  в зоне горения можно приближенно описать с помощью следующего уравнения, полученного с использованием известной формулы Стокса:

$$\frac{dV_s}{dx} \approx \frac{1}{V_s} \left[ \frac{18\eta}{\rho_s d^2} (V_G - V_s) + g \right] \quad (2)$$

где  $\eta$  — коэффициент вязкости газовой среды,  $V_G$  — скорость газового потока перед фронтом пламени,  $\rho_s$  — плотность твердой частицы, а  $g$  — ускорение свободного падения.

Уравнения (1) и (2) решались одновременно численным методом с учетом условий данного эксперимента. Полученные результаты показали, что при  $S < 100 \text{ м}^2/\text{кг}$  максимальная температура твердых частиц практически не превышает  $700 \text{ К}$ . На основе термогравиметрического анализа порошков  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaF}$  и  $\text{CaCO}_3$  можно заключить, что в таких условиях степень разложения или возгонки твердых частиц является пренебрежимо малой величиной. Следовательно, воздействие частиц исследуемых порошков на распространение пламени в бедных водород-воздушных смесях в данных опытах имеет, в основном, гетерогенный характер.

С использованием теоретических предпосылок, принятых в работе [5], нами был проведен соответствующий теоретический анализ, который дал возможность записать приближенное выражение для  $\Delta E$  — величины тепловой энергии, передаваемой из газовой среды (единичной массы) к твердым частицам, проходящим через зону горения:

$$\Delta E \approx \frac{\alpha \lambda_0 \rho_s l}{3 \rho_0 T_0^2 (T_1 - T_2) u} \cdot \frac{WS^2}{1 + bS^2} \quad (3)$$

Здесь  $\lambda_0$  — коэффициент теплопроводности газа при начальной (комнатной) температуре  $T_0$ ,  $l$  — "толщина" зоны горения,  $u$  — скорость перемещения фронта пламени,  $\rho_0$  — плотность газовой среды при температуре  $T_0$ ; коэффициент  $b$  определяется химическим составом твердых частиц и газовой фазы, а также условиями проведения опытов. Параметр  $\alpha$  выражается следующим образом:

$$\alpha = \int_{T_0}^{T_1} T^2 (T - T_0) dT,$$

где  $T_1$  — максимальная температура пламени.

Если гетерогенное ингибирование пламени обусловлено действием термического фактора (охлаждением зоны горения), то можно допустить, что достижение предельной концентрации твердых частиц в реакторе ( $W = W_c$ ) соответствует критическому значению величины  $\Delta E$ :  $\Delta E = (\Delta E)_{кр}$ . В таких условиях распространение пламени становится невозможным.  $(\Delta E)_{кр}$  зависит от состава реакционной смеси, от условий проведения эксперимента, и если они зафиксированы, то  $(\Delta E)_{кр}$  можно приближенно считать постоянным. В таком случае из уравнения (3) получаем, что  $W_c$  является линейной функцией от  $1/S^2$ :  $W_c \sim (1/S^2 + b)$ . Экспериментальные данные, представленные на рис.2, удовлетворительно согласуются с этим выводом. Все это указывает на то, что в условиях данного эксперимента гетерогенное ингибирование бедного водородного пламени обусловлено преимущественно эффектом охлаждения зоны горения.

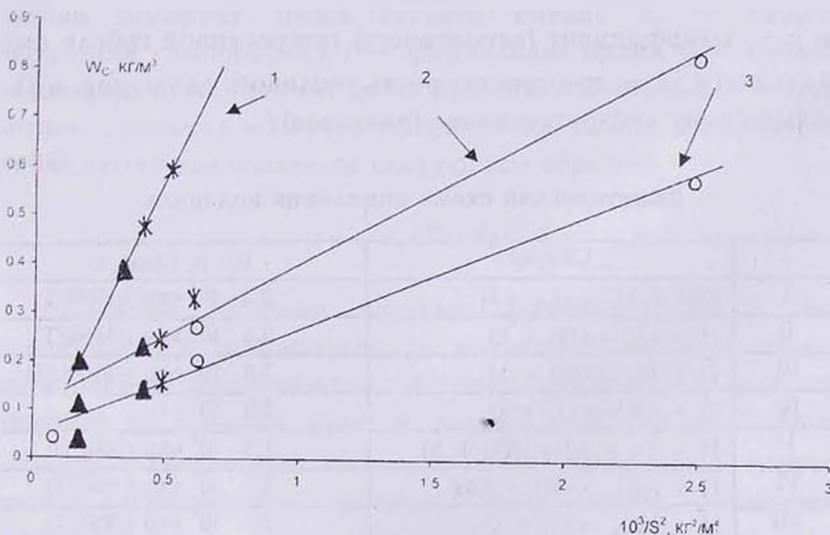
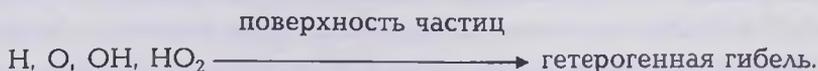


Рис.2. Зависимость предельной концентрации порошков  $\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{O})$ ,  $\text{NaF}$  ( $\Delta$ ) и  $\text{CaCO}_3$  (\*) в реакторе от параметра  $1/S^2$  при различных содержаниях  $\text{H}_2$  в исходной смеси с воздухом ( $P=1$  атм.): 1 — 10%; 2 — 12%; 3 — 14%.

Как уже отмечалось, помимо термического ингибирования, твердые частицы могут действовать и как гетерогенные химические ингибиторы. Для выяснения возможной роли гетерогенных химических факторов нами было предпринято математическое моделирование ингибированного водород-воздушного пламени. Упрощенная кинетическая схема высокотемпературного окисления водорода включала 11 элементарных стадий, которые представлены в таблице; там же указаны выражения для соответствующих констант скоростей, заимствованные из работ [17, 18].

Для описания гетерогенной гибели атомов и радикалов на поверхности твердых частиц к указанным стадиям были добавлены еще 4 стадии:



Константы скоростей записывались следующим образом (см. [16]):

$$k_{\text{ГЕТ. } j} = \frac{\varepsilon_j U_j D_j \rho_s S}{3\varepsilon_j U_j + 4D_j \rho_s S} SW \quad (4)$$

где  $\varepsilon_j$  — коэффициент (вероятность) гетерогенной гибели атома (радикала)  $j$ ,  $U$  — средняя скорость теплового движения, а  $D_j$  — коэффициент диффузии атома (радикала)  $j$ .

Таблица

Кинетическая схема окисления водорода

v	Стадия	$Kv$ ; м, Моль, с
I	$\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	$2,2 \cdot 10^7 \exp(-2590/T)$
II	$\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O}$	$2,2 \cdot 10^8 \exp(-8450/T)$
III	$\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{H}$	$3,0 \cdot 10^7 \exp(-5066/T)$
IV	$\text{O} + \text{OH} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}$	$3,0 \cdot 10^7$
V	$\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{M}$	$1,5 \cdot 10^3 \exp(500/T)$
VI	$\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$	$2,5 \cdot 10^8 \exp(-950/T)$
VII	$\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}_2$	$2,5 \cdot 10^7 \exp(-350/T)$
VIII	$\text{O} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O}_2$	$3,0 \cdot 10^7$
IX	$\text{H} + \text{OH} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{M}$	$2,3 \cdot 10^4 \exp(600/T)$
X	$\text{OH} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	$3,0 \cdot 10^7$
XI	$\text{H} + \text{H} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2 + \text{M}$	$6,0 \cdot 10^5 \cdot T^{-1}$

Математическая модель одномерного ламинарного пламени включала систему следующих базисных уравнений [19]:

уравнение непрерывности потока

$$-\frac{d}{dx}(\rho v) = \frac{d\rho}{dt}, \quad (5)$$

уравнение теплопроводности

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} - C_p \frac{d}{dx}(\rho v t) + \sum_{v=1}^{11} \Omega_v Q_v - q = C_p \rho \frac{dT}{dt}, \quad (6)$$

уравнение диффузии

$$(D_j \rho) \frac{d^2 \alpha_j}{dx^2} - \frac{d}{dx}(\rho v \alpha_j) + R_j = \frac{d}{dt}(\rho \alpha_j), \quad j = 1, 2, \dots, 7. \quad (7)$$

Здесь  $v$  — скорость газового потока относительно фронта пламени,  $\lambda$  и  $C_p$  — средний коэффициент теплопроводности и теплоемкость газовой среды в зоне пламени,  $\Omega_v$  — скорость элементарной стадии  $v$ ,  $Q_v$  — тепловой эффект этой стадии,  $\alpha_j$  — концентрация компонента  $j$  в газовой фазе, моль/кг ( $\alpha_j = f_j/M$ , где  $f_j$  — мольная доля компонента  $j$  в газовой среде, а  $M$  — средняя молярная масса газовой смеси),  $R_j$  — скорость накопления компонента  $j$ ,  $t$  — формальное время,  $q$  — скорость теплопередачи из газовой фазы (единичного объема) к твердым частицам, которая в случае сферических частиц в ламинарном приближении записывается следующим образом:

$$q = \frac{\lambda}{3} \rho_s (T - \theta) S^2 W \quad (8)$$

Численное решение системы уравнений (5)÷(7) было осуществлено с использованием конечно-разностной схемы в стационарном приближении. В таких условиях частные производные по  $t$  равны нулю и  $\rho v = \rho_0 v_0$ , где  $\rho_0$  — плотность исходной реакционной смеси, а  $v_0$  — нормальная скорость горения. Граничные условия записывались следующим образом:

$$\text{при } x = 0 \quad T = T_0 = 300 \text{ K}, \quad \alpha_j = \alpha_j^0;$$

$$\text{при } x = l \quad \frac{dT}{dx} = 0, \quad \frac{d\alpha_j}{dx} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, 7$$

где  $\alpha_j^0$  — концентрация  $j$  в исходной реакционной смеси, а  $l$  — "толщина" пламени.

Численные значения физических параметров были заимствованы из соответствующей справочной литературы. На рис.3 представлены результаты расчета неингибированного пламени водорода в условиях атмосферного давления ( $T_1 = 1400$  K).

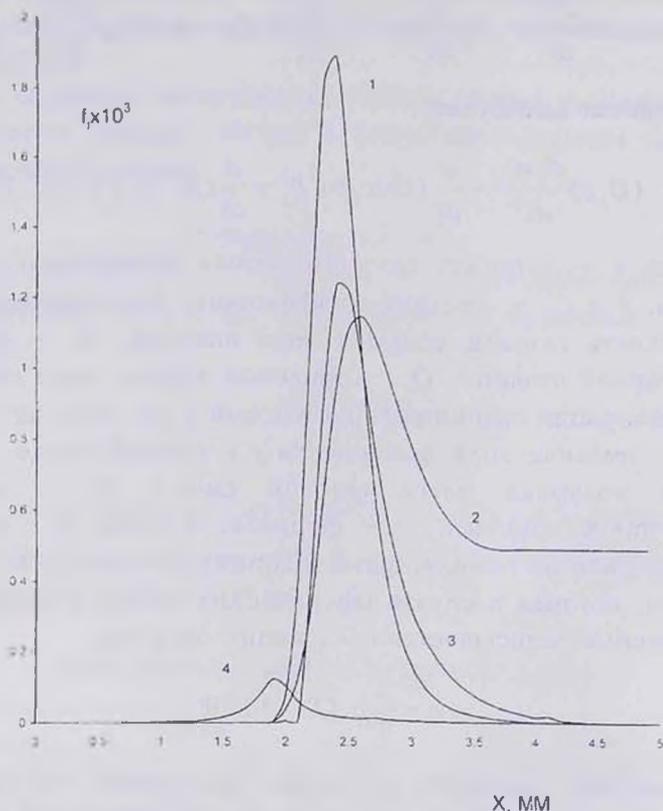


Рис.3. Расчетные концентрационные профили  $f_i$  неингибированного пламени водорода (12%  $H_2$  в исходной смеси с воздухом) при  $P=1$  атм и  $V_0=0,25$  м/с: 1—H, 2 — OH, 3 — O, 4 —  $HO_2$ .

Для упрощения моделирования ингибированного пламени были выбраны крупные частицы  $Na_2SO_4$  с удельной поверхностью  $42$  м<sup>2</sup>/кг. В таких условиях  $\theta$  незначительно превышает  $300$  K. Когда при моделировании процесса ингибирования учитывалась только гетерогенная гибель активных центров реакции на

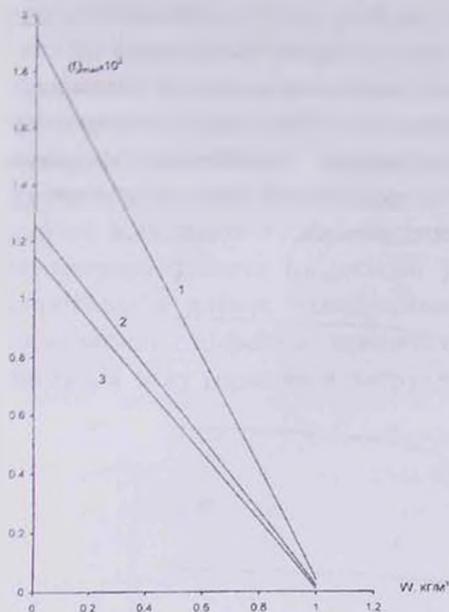


Рис. 4. Зависимость максимальных концентраций активных центров горения водорода  $(f_i)_{\max}$  (12%  $H_2$  в исходной смеси с воздухом) от содержания частиц порошка  $Na_2SO_4$  в реакторе (в условиях термического ингибирования) при  $S(Na_2SO_4) = 42 \text{ м}^2/\text{кг}$  и  $V_0 = 0,25 \text{ м/с}$ . 1 — Н, 2 — О, 3 — ОН.

рисунок, увеличение концентрации термического ингибитора в реакторе приводит к резкому уменьшению концентраций атомов и радикалов в зоне горения. Следовательно, воздействие твердых частиц порошка на распространение пламени в бедной водород-воздушной смеси обусловлено, в основном, охлаждением зоны горения, а не гетерогенной гибелью ведущих активных центров реакции на поверхности этих частиц.

Далее нами было предпринято изучение воздействия твердых частиц порошков на распространение пламени в богатой водород-воздушной смеси. Вначале было осуществлено математическое моделирование ингибирования пламени по вышеописанной схеме (состав исходной реакционной смеси: 70%  $H_2 + 30\%$  воздуха). Учитывались факторы как "термического", так и гетерогенного химического ингибирования (гетерогенной гибели активных центров реакции на поверхности твердых

поверхности частиц, то оказалось, что полученные таким путем концентрационные профили почти не отличаются от соответствующих профилей неингибированного пламени. Это означает, что химический гетерогенный фактор в данном случае играет лишь незначительную роль.

Учет термического фактора при моделировании ингибированного пламени значительно изменил вышеуказанные профили в зоне горения водорода. На рис. 4 показаны зависимости максимальных концентраций активных центров реакции от параметра  $W$ , когда частицы порошка оказывают только охлаждающее воздействие на пламя. Как видно из

частиц). Результаты моделирования показали, что в данном случае крупные частицы порошка  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  могут действовать не только как термические, но и как гетерогенные химические ингибиторы (рис.5). Это означает, что в отличие от "бедного" пламени, в случае ингибирования "богатого" водородом пламени, помимо фактора охлаждения, значительную роль может играть также и фактор гетерогенной гибели атомов и радикалов на поверхности частиц порошка.

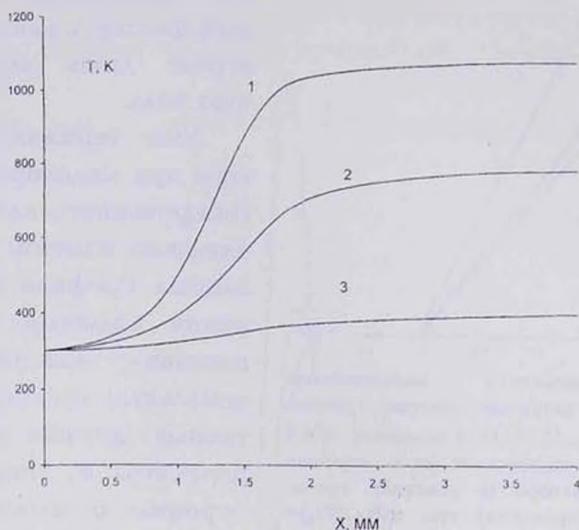


Рис.5. Расчетные температурные профили богатого пламени водорода ( $70\% \text{H}_2$  в исходной смеси с воздухом) при  $P=1$  атм и  $V_0=0,70$  м/с: 1 — неингибированное пламя; 2 — гетерогенное химическое ингибирование частицами порошка  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ( $S=42$  м<sup>2</sup>/кг,  $W=0,5$  кг/м<sup>3</sup> и  $\epsilon_1=0,5$ ); 3 — термическое ингибирование частицами порошка  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ( $S=42$  м<sup>2</sup>/кг,  $W=0,5$  кг/м<sup>3</sup>).

Эксперименты по изучению влияния твердых частиц на распространение пламени в богатой водород-воздушной смеси ( $\% \text{H}_2=70$ ) были проведены в вертикальном реакторе с внутренним диаметром 50 мм и высотой 1500 мм. Определялась скорость перемещения пламени в реакционной смеси атмосферного давления в присутствии частиц порошка  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  со средним диаметром  $d=85$  мкм. Результаты измерений показали, что в данном случае подавление пламени невозможно даже при очень высоких концентрациях твердых частиц (вплоть до  $5$  кг/м<sup>3</sup>). Кроме того, введение частиц порошка в реактор вызывает

сильное увеличение видимой скорости пламени, как это показано на рис.6.

По нашему мнению, причиной такого неожиданного результата являются газодинамические возмущения, возникающие из-за присутствия крупных твердых частиц перед фронтом пламени (подобные эффекты не учитывались при математическом моделировании данного процесса). Такие возмущения вызывают турбулизацию газового потока и усложняют геометрию фронта (подобные усложнения также были зафиксированы в наших экспериментах). По-видимому, эти газодинамические эффекты препятствуют проникновению твердых частиц в зону горения и затрудняют подавление пламени.

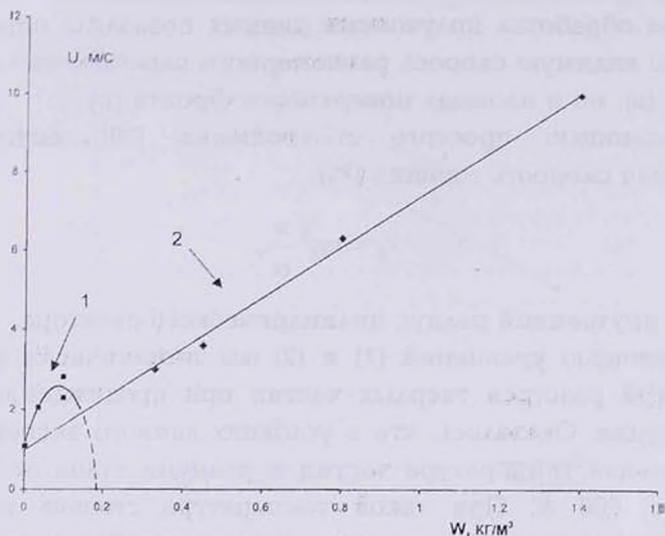


Рис.6. Зависимости видимой скорости перемещения фронта богатого пламени (70%  $H_2$  в исходной смеси с воздухом) при атмосферном давлении от концентрации частиц порошков  $NaHCO_3$  и  $Na_2SO_4$  в реакторе: 1 —  $d (NaHCO_3) \approx 5$  мкм, 2 —  $d (Na_2SO_4) \approx 85$  мкм.

На основе вышеизложенного можно предположить, что использование твердых частиц малых размеров может привести к ослаблению турбулизации и, в конечном счете — подавлению процесса горения. Такое предположение было подтверждено результатами дополнительных опытов, в которых в качестве ингибирующих добавок использовались частицы  $NaHCO_3$  очень малых размеров ( $d \approx 5$  мкм). Как видно из рис.6, увеличение

массовой концентрации указанных частиц в реакторе до  $\sim 0,1 \text{ кг/м}^3$  вызывает увеличение скорости перемещения пламени примерно в 2,5 раза, но уже при  $W \approx 0,18 \text{ кг/м}^3$  происходит полное подавление горения.

Помимо водород-воздушных смесей, нами было изучено также гетерогенное ингибирование распространения пламени в стехиометрической этан-воздушной смеси атмосферного давления. В качестве ингибирующих добавок использовались порошки безводного  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , удельные поверхности которых составляли 19, 30 и  $37 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Приготовление реакционной смеси и подача твердых частиц в реактор осуществлялись по вышеописанной методике. Кроме того, с помощью видеосъемки производилась регистрация распространения пламени. Соответствующая обработка полученных данных позволяла определять не только видимую скорость равномерного перемещения фронта пламени ( $u$ ), но и площадь поверхности фронта ( $\sigma$ ).

С помощью простого соотношения [20] вычислялась нормальная скорость горения ( $V_0$ ):

$$V_0 = \pi r_0^2 \frac{u}{\sigma}, \quad (9)$$

где  $r_0$  — внутренний радиус цилиндрического реактора.

С помощью уравнений (1) и (2) мы теоретически оценили возможный разогрев твердых частиц при прохождении через зону горения. Оказалось, что в условиях данного эксперимента максимальная температура частиц в пламени этана не должна превышать  $600 \text{ К}$ . При такой температуре степень возгонки  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ничтожно мала, что указывает на преобладание гетерогенных факторов при ингибировании горения этана частицами порошка данной соли.

Согласно известной теории А.Ван-Тиггелена [6,21], если гетерогенное ингибирование пламени обусловлено гетерогенной гибелью ведущих активных центров реакции горения на поверхности твердых частиц, то квадрат нормальной скорости распространения ингибированного пламени ( $V_{in}^2$ ) является линейной функцией концентрации частиц в реакторе:

$$V_{in}^2 \approx V_0^2 - AW \quad (10)$$

Здесь  $V_0$  представляет нормальную скорость распространения неингибированного пламени, а коэффициент  $A$  зависит от химической природы твердого ингибитора, дисперсности частиц, а также от условий проведения эксперимента. На рис.7 представлена зависимость  $V_m^2$  от параметра  $W$  в условиях данного эксперимента. Видно, что указанная зависимость является практически линейной для различных фракций исследуемого порошка. Такой результат, по-видимому, может служить указанием на преобладание химических факторов при гетерогенном ингибировании этан-воздушного пламени частицами порошка  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

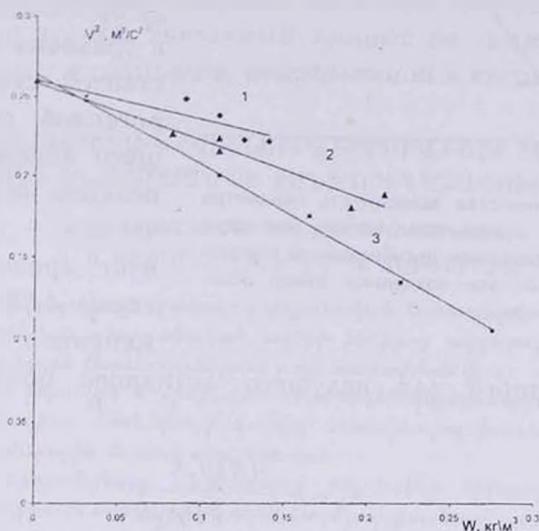


Рис.7. Зависимости нормальной скорости горения стехиометрической этан-воздушной смеси ( $T_0=295\text{ K}$  и  $P=1\text{ атм}$ ) от концентрации порошков  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в реакторе при различных дисперсностях твердых частиц: 1 —  $S=19\text{ м}^2/\text{кг}$ , 2 —  $S=30\text{ м}^2/\text{кг}$ , 3 —  $S=37\text{ м}^2/\text{кг}$ .

На рис.8 показана зависимость коэффициента  $A$  от удельной поверхности частиц в логарифмических координатах. Эта зависимость описывается прямой линией, наклон которой составляет 1,19 со стандартным отклонением  $\pm 0,11$ . Следовательно, можно считать, что наклон данной прямой практически равен 1. Такой результат указывает на существование пропорциональной зависимости между величинами  $S$  и  $A$ :

$A \approx A_0 S$ , где  $A_0$  — коэффициент пропорциональности. С учетом сказанного выражение (10) принимает следующий вид:

$$V_m^2 \approx V_0^2 - A_0 S W. \quad (11)$$

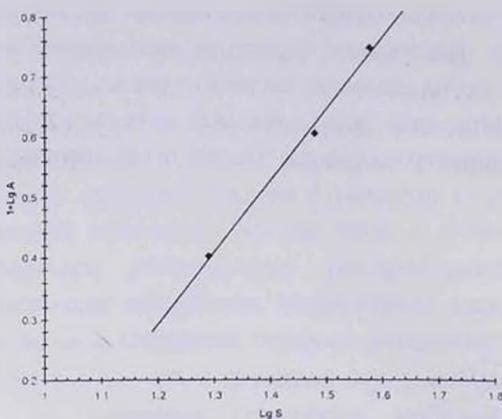


Рис. 8. Логарифмическая зависимость параметра  $A$  от удельной поверхности частиц порошков  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  при гетерогенном ингибировании горения стехиометрической этан-воздушной смеси атмосферного давления.

Если в условиях данного эксперимента ингибирование пламени обусловлено действием химического гетерогенного фактора, то можно предположить, что между произведением " $A_0 S W$ " в уравнении (11) и константой скорости гетерогенной гибели ведущего активного центра реакции на поверхности частиц —  $k_{\text{гет}}$  существует пропорциональная связь:  $A_0 S W \sim k_{\text{гет}}$ . С применением уравнения

(4), записанного для ведущего активного центра горения, получим:

$$A_0 \sim \frac{\varepsilon U D \rho_s S}{3 \varepsilon U + 4 D \rho_s S} \quad (12)$$

Результаты нашего эксперимента показывают, что коэффициент  $A_0$  практически не зависит от удельной поверхности частиц —  $S$ . На основе выражения (12) можно заключить, что в таком случае выполняется неравенство:  $3 \varepsilon U \ll 4 D \rho_s S$ . Следовательно,  $A_0 \sim U$ . Полученный результат указывает на протекание гетерогенной гибели ведущего активного центра реакции на поверхности частиц порошка в области, не лимитируемой диффузией этого центра к твердым частицам.

Таким образом, экспериментально и теоретически изучено гетерогенное ингибирование распространения пламени в бедных водород-воздушных смесях порошками неорганических солей при атмосферном давлении. Показано, что процесс инги-

бирования имеет термический характер, т.е. обусловлен охлаждением зоны горения твердыми частицами. Изучение гетерогенного ингибирования распространения пламени в богатой водород-воздушной смеси показывает, что крупные частицы порошка вызывают сильные газодинамические возмущения перед фронтом пламени. Это обуславливает значительное ускорение фронта и затрудняет подавление горения. Уменьшение диаметра частиц способствует ослаблению газодинамических возмущений. Экспериментально изучено ингибирование горения этан-воздушной смеси стехиометрического состава порошками сульфата натрия. Показано, что в условиях данного эксперимента эффект ингибирования обусловлен гетерогенной гибелью ведущих активных центров реакции на поверхности частиц. Указанный процесс не лимитируется диффузией атомов и радикалов, направленной к твердым частицам.

**ԱՅՐՎՈՂ ԳԱԶԱՅԻՆ ԽԱՌՆՈՒՐԳՆԵՐՈՒՄ ԲՈՑԻ ՏԱՐԱԾՍԱՆ  
ՀԵՏԵՐՈԳԵՆ ԻՆՀԻՍԵՄԱՆ ՄԻ ՔԱՆԻ ՕՐԻՆԱԶԱՓՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ**

**Զ. Գ. ԶՈՅՆԵՆԻԶԵ, Դ. Ն. ԼՈՐԴԿԻՊԱՆԻԶԵ,  
Գ. Ս. ԲԵԶԱՐԱՇՎԻԼԻ և Մ. Դ. ՄՈՒՍԵՐԻԶԵ**

*Ուղղահայաց խողովակի եղանակով փորձնական ճանապարհով ուսումնասիրվել է տարբեր փոշենման անօրգանական աղերի ինհիբիցիոն ազդեցությունը օդաջրածնային և օդ-էթանային խառնուրդներում բոցի տարածման վրա:*

*Պարզված են ջերմային և քիմիական հետերոգեն գործոնների տարբեր ավանդները փոշիների պինդ մասնիկների կողմից հետազոտվող խառնուրդներում բոցի տարածման դոմարային ճնշման պրոցեսի վրա:*

*Ստացված արդյունքները համեմատելի են էՂՄ-ի միջոցով իրականացված ջրածնի բոցի ինհիբիցիոն մաթեմատիկական մոդելավորման տվյալների հետ:*

**SOME REGULARITIES OF HETEROGENEOUS INHIBITION OF FLAME  
PROPAGATION IN COMBUSTIBLE GAS MIXTURES**

**Z. G. DZOTSENIDZE, D. N. LORDKIPANIDZE,  
G. S. BEZARASHVILI and M. D. MUSERIDZE**

Presented work is dedicated to investigation of the inhibition mechanism of flame propagation in "Hydrogen-air" and "Ethane-air" mixture by powders of inorganic salts. "Vertical tube" technique and flame simulation were used as the research methods. As a result of tests carried out in lean "Hydrogen-air" mixture, positive linear correlation between the square of solid particles' mean diameter and the critical concentration of powders in the tube has been determined. Theoretical treatment leads to the conclusion, that correlation of such kind must point out thermal mechanism of flame inhibition. As to the flame propagation in rich

"Hydrogen-air" mixture, results of flame simulation indicate the ability of particles, penetrated into reaction zone, to decrease the fundamental flame speed by means both thermal and by chemical inhibition.

It has been found experimentally, that in the case of "Ethane-air" stoichiometric mixture, the square of fundamental flame speed is decreasing linear function of the particles' concentration in gas phase. This fact indicates, that inhibition must be caused mainly by the heterogeneous removal of chain carriers on the surface of solid particles and that the rate of the removal at the same time isn't limited by the diffusion of these carriers to the surface.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Dolan J.E.* // 6<sup>th</sup> Symposium (Int.) on Combustion. New York, 1956, p.787.
- [2] *Lee T.G., Robertson A.F.* // Int. Symposium on the use of models in fire research. Washington, 1961, p.93.
- [3] *Friedrich M.* // Chemiker Zeitung: Chemische Apparatur, 1960, Bd. 84, №17, S.560.
- [4] *Haggerty W., Markels M., Friedman R.* // Fize research abstracts and reviews, 1961, v.3, №3, p.133.
- [5] *Rosser W.A., Inami S.H., Wise H.* // Combustion and flame, 1963, v.7, №2, p.107.
- [6] *Dewitte M., Vrebosch J., Van-Tiggelen A.* // Combustion and flame, 1964, v.8, №4, p.257.
- [7] *Dodding R.A., Simmons R.F., Stephens A.* // Combustion and flame, 1970, v.15, №3, p.313.
- [8] *Laffitte P., Delbourgo R., Combourieu J., Dumont J.C.* // Combustion and flame, 1965, v.9, №4, p.357.
- [9] *Hoffmann W.* // Chemie Ingenieur Technik, 1971, Bd. 43, №9, S.556.
- [10] *Birchall J.D.* // Combustion and flame, 1970, v.14, №1, p.85.
- [11] *Iya K.S., Wollowitz S., Kaskan W.* // 15<sup>th</sup> Symposium (Int.) on Combustion. Pittsburgh, 1974, p.329.
- [12] *Bulewicz E.M., Kucnerowicz-Polak B.J.* // Combustion and flame, 1987, v.70, №2, p.217.
- [13] *Баратов А.Н., Вогман Л.Р., Кобзарь В.Н., Азатян В.В.* // Физика горения и взрыва, 1976, т.12, №1, с.72.
- [14] *Безарашвили Г.С., Баратов А.Н., Азатян В.В., Мусеридзе М.Д., Дзоцендзе З.Г.* // Кинетика и катализ, 1979, т.20, вып.3, с.584
- [15] *Ксандопуло Г.И., Дубинин В.В.* Химия газофазного горения. М., Химия, 1987, с.174.
- [16] *Франк-Каменецкий Д.А.* Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., Наука, 1987, с.107.
- [17] *Baulch D.L., Drysdale D.D., Home D.G., Lloyd A.C.* Evaluated Kinetic Data for High Temperature Reactions. London, Butterworths, 1972, p.430.
- [18] *Bowman C.T.* // Combustion Science and Technology, 1971, v.3, №1, p.37.
- [19] *Гишфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р.* Молекулярная теория газов и жидкостей. М., ИЛ, 1961, с. 409.
- [20] *Linnett J.W.* // 4<sup>th</sup> Symposium (Int.) on Combustion. Baltimore, 1953, p.20.
- [21] *Van-Tiggelen A., Deckers J.* // 6<sup>th</sup> Symposium (Int.) on Combustion. New-York, 1956, p.61.