

расходования соли. Полученные данные показывают, что реакцией, протекающей в этих условиях и определяющей ускорение, может оказаться непосредственное взаимодействие реакционноспособных продуктов — окислов хлора с ПХА. Тогда торможение распада и дополнительное накопление хлорной кислоты будет обусловлено взаимодействием воды с окислами хлора.

Поступила в редакцию
20/III 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник «Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону». М., Изд-во АН СССР, 1962.
2. S. H. Jпami, W. A. Rosser, H. Wise. *J. Phys. Chem.* 1963, 67, 1077.
3. L. L. Birgumshaw, B. H. Newman. *Proc. Roy. Soc.*, 1954, A227, 115, A227, 1955, 228.
4. A. K. Galwey, P. W. Jacobs. *Proc. Roy. Soc.*, 1960, A254, 455.
5. S. H. Jпami, W. A. Rosser, H. Wise. *Trans. Far. Soc.*, 1966, 62, 723.
6. А. В. Раевский, Г. Б. Манелис. Докл. АН СССР, 1963, 151, 880.
7. Г. Б. Манелис, Ю. И. Рубцов. *ЖФХ*, 1966, 15, 770.
8. Б. С. Светлов, В. А. Коробан. *Кинетика и катализ*, 1968, 8, 458.
9. Б. С. Светлов, В. А. Коробан, Л. Б. Румянцева. Сб. «Теория взрывчатых веществ». М., изд-во «Вышая школа», 1967.
10. J. N. Maуcock, V. R. Pai Verneker, P. W. M. Jacobs. *J. Chem. Phys.*, 1967, 46, 2857.
11. В. П. Бабаева, А. А. Зиновьев. *ЖНХ*, 1963, 8, 567.
12. Н. Н. Семенов. *Цепные реакции*. Л., ГХТИ, 1934.

УДК 536.468+662.222.1

ИССЛЕДОВАНИЕ В ОБЛАСТИ ИНГИБИРОВАНИЯ ПЛАМЕН $H_2 - O_2 - N_2$ -СМЕСЕЙ ГАЛОИДУГЛЕВОДОРОДАМИ

А. Н. Баратов, Ф. А. Карагулов, В. И. Макеев
(Москва)

В настоящей работе сообщаются результаты ряда экспериментальных исследований степени влияния тетрафтордибромэтана и бромэтила на характер развития взрыва в бомбе постоянного объема и нормальную скорость распространения пламени смесей водорода с воздухом.

Известно, что ингибирующее воздействие галоидалкилов на пламена составляет сложный комплекс физико-химических процессов. Проведенные ранее многочисленные исследования в этой области заключались, как правило, в оценке воздействия этих добавок на область воспламенения и скорость распространения пламени [1].

Интересно проследить за воздействием ингибирующих добавок на характер развития взрыва. Этот метод является весьма универсальным, поскольку дает возможность определить влияние добавки на изменение давления взрыва, скорость распространения пламени, степень превращения, а также производить анализ продуктов реакции. Исследования производились на установке, схематически изображенной на рис. 1. В камере 5 по парциальным давлениям готовилась смесь $H_2 - O_2 - N_2$ заданного состава, тщательно перемешивалась и поджигалась искрой, получаемой при разряде конденсатора емкостью 0,25 мкф и напряжени-

ем на обкладках 4 кв. Замер давления взрыва производился тензометрически с записью результатов с помощью шлейфного осциллографа. Из индикаторных диаграмм $p=f(\tau)$ рассчитывалась нормальная скорость горения:

$$u_n = \frac{1}{\tau_p} \sqrt[3]{\frac{3(p-p_0)v}{4\pi(\varepsilon-1)\varepsilon^2}}, \quad (1)$$

где p — давление взрыва, кгс/см^2 ; p_0 — начальное давление в камере (атмосферное), кгс/см^2 ; v — объем камеры, см^3 ; τ_p — время нарастания давления в камере до значения $p=0,05 \text{ ати}$, сек ; ε — коэффициент расширения, учитывающий степень изменения молярности и температуры газовой смеси в процессе ее сгорания.

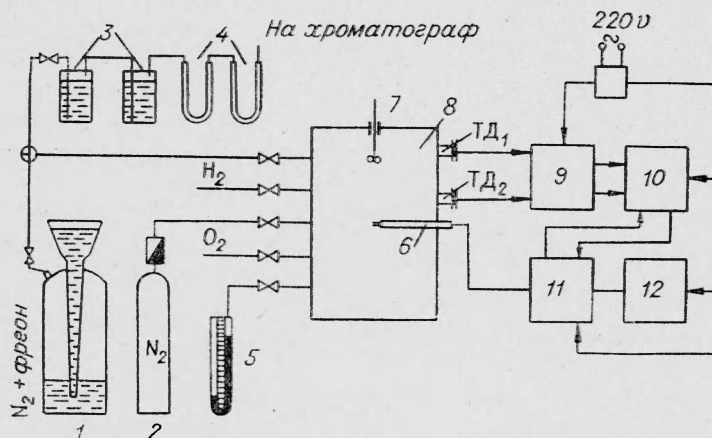


Рис. 1. Схема установки для исследования характера взрыва: 1 — газометр со смесью; 2 — баллон с азотом; 3 — поглотительные склянки; 4 — осушительные колонки; 5 — вакуумметр; 6 — поджигающее устройство; 7 — вентиль; 8 — взрывной сосуд емкостью 20 л; 9 — тензоусилитель; 10 — шлейфный осциллограф; 11 — блок синхронизации; 12 — источник высокого напряжения (ТД₁ и ТД₂ — тензометрические датчики).

Строго говоря, ε не является постоянной величиной, однако в принятый нами начальный период развития взрыва, соответствующий сгоранию смеси около 3% от исходного объема, изменением ε можно пренебречь [2].

Степень сгорания водорода оценивалась по характеру изменения объема смеси в процессе горения, а также путем анализа продуктов реакции на хроматографе «Цвет». Отбор проб на анализ производился с помощью аспиратора, заполненного раствором щелочи. После нейтрализации кислых продуктов реакции, контролируемой по величине рН, и осушки в колонке с хлористым кальцием пробы разделялись хроматографически на молекулярных ситах 5А. Анализ проводился преимущественно на содержание остаточного кислорода.

Помимо этих исследований были поставлены опыты по определению нормальной скорости распространения пламени водородно-воздушной смеси с добавками тетрафтордибромэтана и бромистого этила методом горелки Бунзена. Нормальная скорость распространения пламени определялась по шпирен-фотографиям конуса пламени [2] и вычислялась по формуле

$$u_n = \omega \cdot \sin \frac{\alpha}{2},$$

где ω — средняя скорость газовой смеси, см/сек ; α — угол вершины конуса.

Одновременно с помощью прямого фотографирования конуса пламени определялась толщина светящейся зоны пламени, измерение которой производилось на микрофотометре МФ-4 с десятикратным увеличением изображения пламени, полученного на пленке. С помощью этих данных была произведена оценка изменения среднего молекулярного веса активных носителей цепи, доминирующих в развитии процесса окисления водорода в присутствии добавок тетрафтордибромэтана и бромистого этила, в соответствии с теорией Ван Тиггелена [3] по уравнению

$$\frac{u_0}{\sqrt{T_m}} = \frac{\text{const}}{\sqrt{M_R}} \cdot \frac{1}{S}, \quad (2)$$

где u_0 — нормальная скорость распространения пламени, отнесенная к невоспламененному газу, см/сек; M_R — средний молекулярный вес активных носителей цепи; S — толщина фронта пламени, см; T_m — средняя температура пламени (°К), которая, согласно [4], принималась $T_m = T_0 + 0,74(T_f - T_0)$ (T_f — теоретическая температура пламени; T_0 — исходная температура смеси).

Результаты воздействия добавок на характер развития взрыва смеси водорода с воздухом графически представлены на рис. 2. Анализ данных показывает, что с введением в горючую смесь добавок исследован-

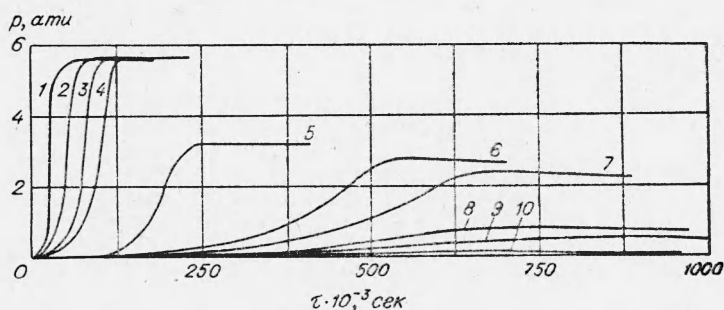


Рис. 2. Индикаторные диаграммы взрывов (кривые нарастания давления во времени).

1 — 60% H_2 + воздух; 2 — 60% H_2 + 0,2% $C_2F_4Br_2$ + воздух; 3 — 60% H_2 + 0,5% $C_2F_4Br_2$ + воздух; 4 — 60% H_2 + 0,8% $C_2F_4Br_2$ + воздух; 5 — 10% H_2 + воздух; 6 — 10% H_2 + 0,2% $C_2F_4Br_2$ + воздух; 7 — 10% H_2 + 0,5% $C_2F_4Br_2$ + воздух; 8 — 10% H_2 + 1% $C_2F_4Br_2$ + воздух; 9 — 10% H_2 + 3% $C_2F_4Br_2$ + воздух; 10 — 10% H_2 + 6% $C_2F_4Br_2$ + воздух.

шихся галоидалкилов скорость повышения давления заметно уменьшается. Особенно эффективное снижение скорости нарастания давления наблюдается при введении первых малых добавок ингибитора. Богатые горючим компонентом смеси ингибируются значительно легче, чем бедные. Причем при добавлении в смесь, содержащую 60% водорода, всего около 0,85% $C_2F_4Br_2$ последняя смесь становится невзрывчатой. В случае бедных смесей пламя распространяется после внесения добавок даже свыше 5%.

Интересно отметить, что с добавлением ингибиторов происходит снижение результирующего давления взрыва, что объясняется, очевидно, разбавлением смеси и снижением температуры продуктов сгорания. В богатых же смесях вплоть до прекращения горения сохраняется постоянное значение результирующего давления взрыва, что свидетельствует об отсутствии заметного понижения температуры горения. Эти факты указывают на то, что при введении $C_2F_4Br_2$ и C_2H_5Br в бедные смеси

снижение скорости горения достигается как химическим ингибированием, так и разбавлением горючей смеси, а в случае богатых смесей подавление горения обуславливается в основном первым фактором (рис. 3).

При повышении содержания $C_2F_4Br_2$ u_n начинает снижаться (например, для смеси с 10% H_2) по линейному закону, что подтверждает предположение о повышении в этих условиях влияния разбавления смеси.

Аналогичный вывод можно сделать при анализе кривой, характеризующей степень превращения. Заметное превращение наблюдается при введении в смесь лишь до 1—2% $C_2F_4Br_2$.

На рис. 4, 5 и 6 представлены экспериментальные данные по влиянию добавок бромэтила и тетрафтордибромэтана на u_n полученные методом горелки Бунзена. Как видно из этих графиков, максимальная скорость неингибированной смеси равна 274 см/сек и максимум скорости смещен в сторону богатых смесей ($\lambda=1,75$). Эти значения хорошо согласуются с данными [5]. Интересно отметить, что с введением добавки максимум скорости закономерно смещается в сторону бедных смесей: так, с введением 2% C_2H_5Br максимальная скорость соответствует составу горючей смеси, характеризуемому значением $\lambda=0,8$, а при введении 2% $C_2F_4Br_2$ — составу с $\lambda=1,5$. Эти результаты подтверждают отмеченное выше различное воздействие галоидалкилов на бедные и богатые смеси и более высокую ингибирующую эффективность C_2H_5Br по сравнению с $C_2F_4Br_2$. Обобщая полученные в работе данные, можно отметить следующие основные результаты:

1) наиболее эффективно ингибируются богатые смеси, горение которых лимитируется содержанием кислорода;

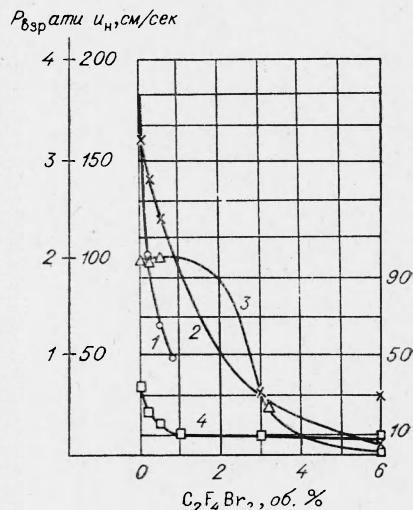


Рис. 3. Зависимость нормальной скорости распространения пламени (u_n , см/сек), степени превращения (K) и результирующего давления взрыва $P_{взр}$ от добавки.

1 — u_n для смеси с 60% H_2 ; 2 — P_{max} для смеси с 10% H_2 ; 3 — K для смеси с 10% H_2 ; 4 — u_n для смеси с 10% H_2 .

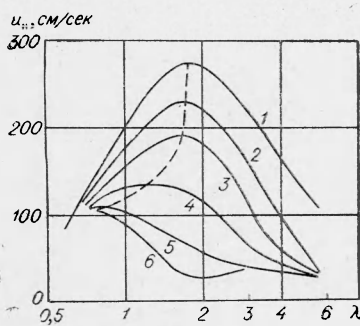


Рис. 4. Влияние C_2H_5Br на u_n (фактическое отношение $H_2/воздух$ / стехиометрическое отношение $H_2/воздух$).

1 — неингибированная смесь; добавка C_2H_5Br , %; 2 — 0,2; 3 — 0,5; 4 — 1,0; 5 — 1,5; 6 — 2,0.

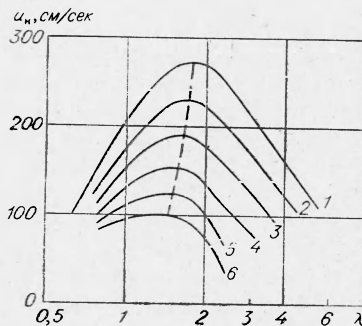


Рис. 5. Влияние $C_2F_4Br_2$ на u_n .

1 — неингибированная смесь; добавка $C_2F_4Br_2$, %; 2 — 0,2; 3 — 0,5; 4 — 1,0; 5 — 1,5; 6 — 2,0.

2) специфическое ингибирующее воздействие оказывают первые малые добавки ингибиторов. При повышенном содержании добавки ингибитор оказывает преимущественно разбавляющее действие.

Из полученных результатов следует важный практический вывод: для повышения огнегасительной эффективности галоидуглеводородов следует одновременно с подачей ингибитора в очаг горения производить разбавление воздуха инертным газом.

С учетом известных представлений о механизме окисления водорода [6] изложенных выше данных можно предложить следующую последовательность элементарных химических актов при воздействии ингибиторов на окисление водорода:

1. $H_2 + O_2 \rightarrow 2OH\cdot$ — зарождение цепи;
2. $OH\cdot + H_2 \rightarrow H_2O + H\cdot$ — продолжение цепи;
3. $H\cdot + O_2 \rightarrow OH\cdot + O\cdot$ } — разветвление цепи;
4. $O\cdot + H_2 \rightarrow OH\cdot + H\cdot$ }
5. $H\cdot + \text{стенка}$ } — обрыв на стенке;
6. $OH\cdot + \text{стенка}$ }
7. $O\cdot + \text{стенка}$ }
8. $H\cdot + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$ — обрыв в объеме;
9. $HO_2 + \text{стенка} \rightarrow$ гетерогенный обрыв;
10. $HBr + H\cdot \rightarrow H_2 + Br\cdot$ } — обрыв цепи с помощью HBr;
11. $HBr + OH\cdot \rightarrow H_2O + Br\cdot$ }
12. $Br\cdot + H_2 \rightarrow HBr + H\cdot$ — продолжение цепи через $Br\cdot$;
13. $Br\cdot + HO_2\cdot \rightarrow HBr + O_2$ — обрыв цепи через дезактивацию радикала $HO_2\cdot$.

Появление HBr в случае добавления в горючую смесь исследованных ингибиторов можно объяснить взаимодействием молекулы ингибитора с атомарным водородом:

14. $C_2F_4Br_2 + H\cdot \rightarrow C_2F_4Br\cdot + HBr$;
15. $C_2F_4Br\cdot + H\cdot \rightarrow C_2F_4 + HBr$;
16. $C_2H_5Br + H\cdot \rightarrow C_2H_5 + HBr$;

Кроме того, в случае добавления C_2H_5Br можно ожидать дополнительное образование HBr за счет пиролиза этого ингибитора.

Выполненный нами расчет констант равновесия возможных схем пиролиза C_2H_5Br показал, что наиболее вероятной является схема

17. $C_2H_5Br \rightarrow C_2H_4 + HBr$.

Учитывая, что концентрация атомов H в пламени водорода заметно превышает концентрации радикалов OH и атомов O, необходимо, очевидно, полагать доминирующим в ингибировании акт, связанный с заменой атомарного водорода менее активными радикалами в результате реакции с ингибитором.

В смесях, бедных водородом, наряду с этим могут играть заметную ингибирующую роль также реакции гидроксильного радикала и атомов кислорода с молекулой ингибитора.

Кроме этого, следует указать, что продолжение цепи (реакция 2) осуществляется только через радикал OH и потому его удаление является одним из решающих факторов при ингибировании.

Вместе с тем при ингибировании галоидалкилами по приведенной выше схеме появляется дополнительная реакция продолжения цепи (реакция 12), обуславливаемая взаимодействием восстанавливающегося атома галоида с молекулой водорода. Эта реакция образует новую прямую цепь, конкурирующую с основной реакцией продолжения цепи 2. Очевидно, при этом будет происходить замена первоначальных активных носителей цепи (радикалов OH) на другие, более тяжелые атомы галоидов или на их производные. Для проверки этого предположения была предпринята оценка изменения среднего молекулярного веса активных центров с введением в водородно-воздушную смесь добавок тетрафтордибромэтана и бромэтила с помощью метода, предложенного Ван-Тиггеленом и описанного выше.

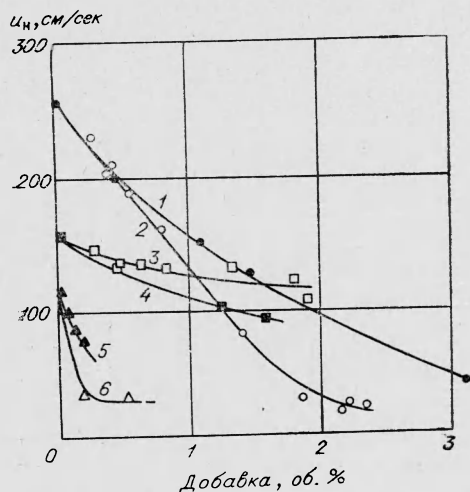


Рис. 6. Зависимость u_n от добавок ингибиторов.

1 — $C_2F_4Br_2$, $\lambda=1,75$; 2 — C_2H_5Br , $\lambda=1,75$; 3 — C_2H_5Br , $\lambda=0,795$; 4 — $C_2F_4Br_2$, $\lambda=0,795$; 5 — $C_2F_4Br_2$, $\lambda=5,71$; 6 — C_2H_5Br , $\lambda=5,71$.

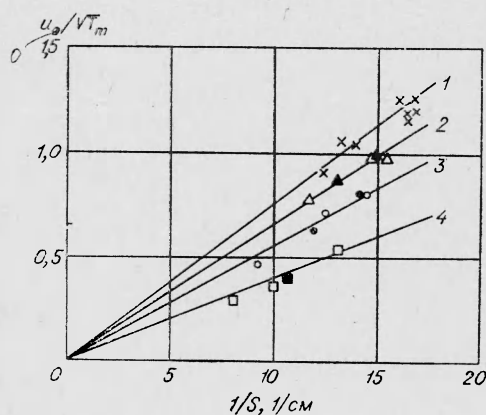


Рис. 7. Зависимость $\frac{u_0}{\sqrt{T_m}} - \frac{1}{S}$ (черные точки — $C_2F_4Br_2$, светлые — C_2H_5Br).

1 — неингибированная смесь; добавка, %: 2 — 0,2; 3 — 0,5; 4 — 1,0.

Результаты обработки экспериментальных данных по уравнению (2) для богатых водородно-воздушных смесей ($\lambda=1,75$; 2,91; 3,57) и для различных добавок тетрафтордибромэтана и бромистого этила представлены на рис. 7. Из графика видно, что с увеличением добавки ингибитора тангенс угла наклона прямых значительно уменьшается, что свидетельствует об увеличении среднего молекулярного веса активных центров M_R . Необходимо отметить, что при добавлении $C_2F_4Br_2$ и C_2H_5Br увеличение M_R одинаково. Это обстоятельство подтверждает наше предположение о том, что в обоих случаях в результате ингибирования происходит замена первоначальных активных центров на более тяжелые атомы брома.

Известно [7], что ингибирование какого-либо процесса связано с повышением энергии активации. Нами оценено изменение энергии активации процесса распространения пламени в зависимости от добавок $C_2F_4Br_2$ и C_2H_5Br . Для этой цели использовано уравнение, предложенное Ван-Тиггеленом в работе [5],

$$u_n = \frac{K_0 T_0}{T_m^{1/2}} \left(\frac{[A]^a [B]^b}{p^i} \right)^{1/2} \left[\exp\left(-\frac{E}{RT_m}\right) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где T_0 — начальная температура газовой смеси, °K; T_m — средняя температура пламени, °K; $[A]$ и $[B]$ — парциальные давления кислорода и водорода в смеси соответственно; p — общее давление реакционной смеси; b и a — порядок реакции по водороду и кислороду соответственно; i — суммарный порядок реакции, принимаемый равным 2.

Вводя в числитель и в знаменатель уравнения (3) множитель $\{[A] + [B]\}^i$, получаем

$$u_n = \frac{K_0 T_0}{T_m^{1/2}} \left\{ \frac{[A]^a [B]^b}{([A] + [B])^i} \left(\frac{[A] + [B]}{p} \right)^i \right\}^{1/2} \left[\exp\left(-\frac{E}{RT_m}\right) \right]^{1/2}. \quad (4)$$

С помощью уравнения (4) можно определить суммарную энергию активации процесса. Для этого введем обозначения:

$$n = \frac{[A]^a [B]^b}{([A] + [B])^i}; \quad x = \frac{[A]}{[B]}; \quad y = \frac{[A] + [B]}{p}.$$

Добавка к богатым смесям исследовавшихся ингибиторов производилась с таким расчетом, чтобы отношение $L = \frac{[C]}{[A]}$ было постоянным (где $[C]$ — содержание ингибитора в %).

Можно показать, что при $x = \text{const}$ значение n будет также постоянным. Учитывая сказанное, после логарифмирования уравнения (4) получаем

$$\lg \frac{u_n^2 T_m}{y^2} = -\frac{E}{RT_m} \lg e + \text{const}. \quad (5)$$

Из наклона полученной линейной зависимости подсчитывалась величина энергии активации процесса распространения пламени.

Результаты исследования приведены на рис. 8 и 9. Данные по u_n получены изложенным выше методом бомбы постоянного объема. Значения температур пламени получены расчетом [8] с учетом диссоциации продуктов сгорания.

Расчитанные из полученных данных значения энергии активации в зависимости от добавки $C_2F_4Br_2$ и C_2H_5Br для смесей $H_2-O_2-N_2$ различного состава представлены в таблице.

Ингибитор	x	Добавка, %	L	E , ккал/моль
—	0,750	—	—	18,6
$C_2F_4Br_2$	0,750	0,5	—	23,6
C_2H_5Br	0,750	0,5	—	30,2
C_2H_5Br	0,333	—	—	16,0
C_2H_5Br	0,1715	—	—	17,8
$C_2F_4Br_2$	0,1715	—	0,071	47,0
C_2H_5Br	0,1715	—	0,0355	90,0

Из полученных данных следует, что энергия активации изменяется при переходе из области бедных смесей в область богатых. Этот факт может свидетельствовать о наличии некоторых различий в механизме процесса окисления водорода в бедных и богатых смесях.

Добавки исследованных галоидалкилов влияют на энергию активации процесса горения бедных смесей весьма слабо. Напротив, для богатых смесей это влияние оказалось значительным. Эти факты служат до-

полнительным подтверждением вышеприведенного механизма ингибирования путем связывания кислородсодержащих радикалов.

Из исследованных ингибиторов более эффективное влияние на кинетику окисления водорода оказывает C_2H_5Br , что также согласуется с данными, приведенными выше.

Полученные результаты дополнительно подтверждают изложенные представления о механизме ингибирования пламени водорода в воздухе галоидалкилами.

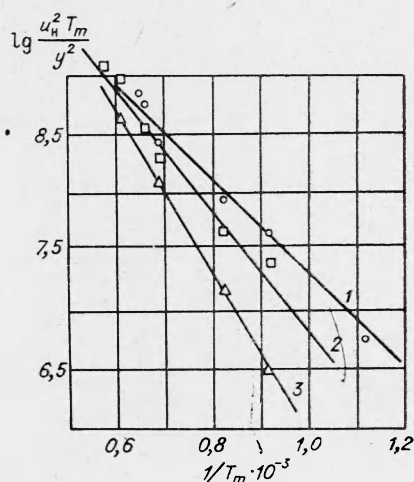


Рис. 8. Зависимость $\lg \frac{u_n^2 T_m}{y^2} - \frac{1}{T_m}$ для бедных смесей.
1 — неингибированная смесь, $x=0,750$;
2 — 0,5% $C_2F_4Br_2$, $x=0,7500$; 3 — 0,5% C_2H_5Br , $x=0,7500$.

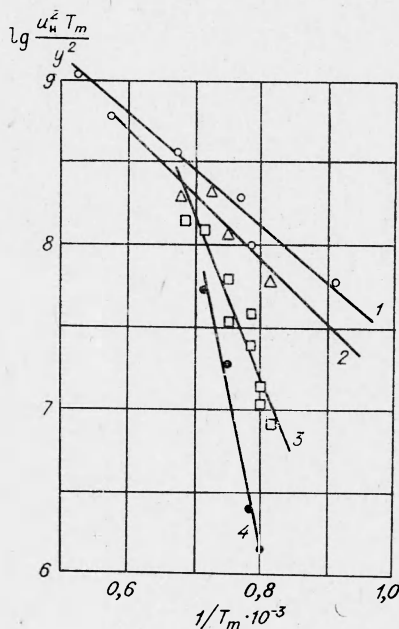


Рис. 9. Зависимость $\lg \frac{u_n^2 T_m}{y^2} - \frac{1}{T_m}$ для богатых смесей.
1 — неингибированная смесь, $x=0,3330$;
2 — неингибированная смесь, $x=0,1715$;
3 — $C_2F_4Br_2$ при $L=0,071$, $x=0,1715$; 4 — C_2H_5Br при $L=0,0355$, $x=0,1715$.

Вместе с тем следует отметить, что при давлении выше второго предела процесс окисления водорода может определяться положительным разветвлением цепей через радикал HO_2 [6]. Поэтому в качестве основного химического акта, ответственного за ингибирование горения водорода, может оказаться реакция 13, связанная с дезактивацией этого радикала. Однако в целом подобный механизм в конечном итоге не противоречит основным результатам настоящей работы и выводам из нее, поскольку и в этом случае ингибирование связано с дезактивацией кислородсодержащего радикала.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Получены данные по нормальным скоростям горения $H_2-O_2-N_2$ -смесей с добавками галоидуглеводородов методами бомбы постоянного объема и горелки Бунзена. Наиболее эффективное воздействие этих добавок на нормальную скорость распространения пламени наблюдалось в богатых смесях.

2. В результате обработки экспериментальных данных по теории Ван-Тиггелена установлено, что при введении в пламя галоидуглеводо-

родов средние молекулярный вес активных центров и энергия активации процесса горения возрастают.

3. На основании полученных данных предложен механизм ингибирования пламен $H_2-O_2-N_2$ галоидуглеводородами, включающий в качестве основной реакции дезактивацию кислородсодержащих радикалов.

Поступила в редакцию
20/III 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Баратов. Ж. ВХО, 1967, XII, 3, 276.
2. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. ИЛ, 1948.
3. A. Van Tiggelen, S. Deckers. Sixth Symposium (International) on Combustion, 1957.
4. A. Van Tiggelen. Mem. Acad. Roy. Belg. 1952, 27, 1.
5. D. R. Miller, R. L. Evers, G. B. Skinner. Combustion and Flame, 1963, 7, 137.
6. В. В. Воеводский, А. Б. Налбандян. Механизм окисления и горения водорода. Изд-во АН СССР, 1949.
7. П. Ашмор. Катализ и ингибирование химических реакций. «Мир», 1966.
8. Р. Веннер. Термохимические расчеты. ИЛ, 1950.

УДК 536.45

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ЧАСТИЦ

Ю. Н. Беляев, Н. В. Камышов, В. Б. Леонас
(Москва)

Прямое экспериментальное исследование элементарных процессов (упругое и неупругое рассеяние), сопровождающих столкновения молекул и атомов в газах при высоких температурах, представляет интерес со многих точек зрения.

Так, изучение упругого рассеяния обеспечивает информацию о силах межмолекулярного взаимодействия, необходимую для расчетов кинетических свойств (вязкости, диффузии и т. п.) [1].

Изучение неупругих столкновений, сопровождающихся перестройкой взаимодействующих молекул, открывает перспективу более глубокого понимания молекулярного и электронного механизмов и энергетики элементарных биомолекулярных реакций.

Результаты таких прямых исследований обеспечивают и наиболее надежную экспериментальную основу дальнейшего развития теоретической химической кинетики и квантовой химии.

Наиболее удобным методом прямого изучения атомно-молекулярных столкновений является хорошо известный теперь метод молекулярного пучка, основанный на исследовании рассеяния пучков атомов или молекул.

Условиями высоких температур (т. е. столкновением с относительными энергиями ~ 1 эв) в настоящее время наиболее отвечает, по-видимому, вариант метода, использующий быстрее (т. е. с энергиями 10^2-10^3 эв) пучки. В этом случае легко осуществим универсальный источник, позволяющий получать пучки практически любых атомов, молекул, радикалов; с другой стороны, в этом диапазоне энергий относи-