ЖУРНАЛ ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ, 2023, том 97, № 8, с. 1207–1212

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

УДК 614:841.12

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ РЕАКЦИОННОГО СОСУДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ ГАЛОГЕНЗАМЕЩЕННЫЙ УГЛЕВОДОРОД

© 2023 г. С. Н. Копылов[a,b,*], П. С. Копылов[c], И. П. Елтышев[c], И. Р. Бегишев[c]

[a] *Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны, Балашиха, Россия*

[b] *Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия*

[c] *Академия государственной противопожарной службы, Москва, Россия*

**e-mail: firetest@mail.ru*

Поступила в редакцию 28.01.2023 г.
После доработки 28.01.2023 г.
Принята к публикации 22.02.2023 г.

Экспериментально исследовано влияние стенки реакционного сосуда на горение при атмосферном давлении газовых смесей, содержащих галогенированные углеводороды. Показано, что при загрязнении стенки продуктами горения поступление с нее в объем дополнительных количеств брома или йода снижает эффективность ингибирования бром- и йодсодержащих углеводородами горения водородовоздушных смесей (эффект сильнее выражен для йодированных веществ), ослабляет самоингибирование горения бромистого этила в смеси с воздухом, что приводит к расширению концентрационной области распространения пламени. На основании анализа известных кинетических данных экспериментально наблюдаемая картина объясняется уменьшением роли цикла регенерации HI при ингибировании йодированным углеводородом горения водорода в воздухе и снижением скорости реакции бромированных углеводородов с атомарным водородом при поступлении со стенки реакционного сосуда дополнительных количеств I_2 и Br_2.

Ключевые слова: горение газов, промотирование, влияние стенки, пары йода, пары брома, галогенированные углеводороды

DOI: 10.31857/S0044453723080113, **EDN:** QVBFDF

При оценке влияния различных факторов на характеристики горения при атмосферном давлении газовых смесей, содержащих галогенированные углеводороды, чаще всего рассматривается влияние размера и формы реакционного сосуда на концентрационные пределы распространения пламени (КПР) [1–3]. Исследования роли состояния поверхности реакционного сосуда в рассматриваемых процессах немногочисленны. При этом данный фактор может быть весьма значим. Так, в [4] при изучении горения бромистого этила в смеси с воздухом при атмосферном давлении в цилиндрическом сосуде объемом 10 дм^3 (диаметр 25 см) было обнаружено, что при загрязнении стенок реакционного сосуда продуктами горения C_2H_5Br его верхний концентрационный предел распространения пламени возрастает более чем на 60%, с 7.9 до 13 об. %, а положение предела зависит от степени загрязнения стенок сосуда. Этот эффект объясняется авторами обогащением богатой горючей смеси сильным окислителем – бромом, выделяющимся с загрязненной продуктами горения поверхности реакционного сосуда.

В [5] минимальная концентрация $C_2F_4Br_2$, делающая невозможным горение смесей H_2 с воздухом любого состава (минимальная флегматизирующая концентрация, МФК), указывается в виде интервала 14.4–15.6 об. %, при том, что это однозначно определяемый в конкретных условиях эксперимента параметр. К сожалению, автор [5] никак не объясняет этот результат. В работе [6] для горения смесей H_2–воздух получено аномально высокое значение МФК C_2F_5I (37.5 об. %) по сравнению с МФК C_2F_5Cl (28.0 об. %), что противоречит известным данным об ингибировании горения газов галогенированными углеводородами (эффективность ингибитора увеличивается в ряду $Cl \ll Br < I$ [7]). Этот эффект объясняется в [6] более низкой скоростью избирательной диффузии атомов H во фронт пламени бедной смеси H_2–воздух в присутствии C_2F_5I. Можно предположить, что наблюдаемый результат является следствием тех же процессов, которые приводят к расширению области распространения пламени, описанному в [4].

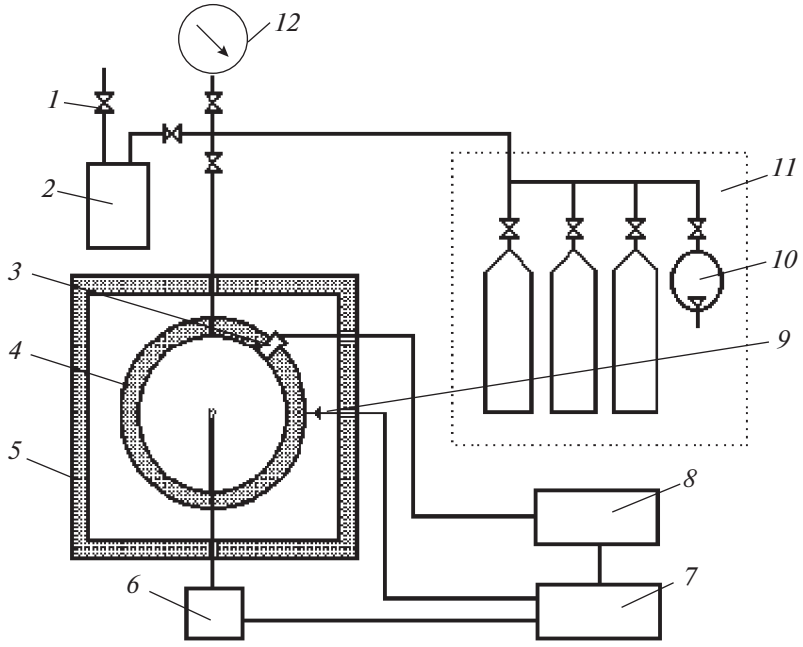


Рис. 1. Схема экспериментальной установки “Вариант”: *1* – кран, *2* – парогенератор, *3* – датчик давления, *4* – реакционный сосуд, *5* – термостат, *6* – устройство зажигания, *7* – контрольная панель, *8* – осциллограф, *9* – термопара, *10* – вакуумный насос, *11* – система ввода газов, *12* – вакуумметр.

Таким образом, наличие в молекуле галогензамещенного углеводорода атомов Br или I обусловливает сложную экспериментальную картину при определении характеристик горения при атмосферном давлении газовых смесей, содержащих галогензамещенные углеводороды. Также нет общепринятого объяснения наблюдаемым явлениям. Настоящая работа посвящена продолжению исследований в данном направлении.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследовалось горение при атмосферном давлении и комнатной начальной температуре смесей H_2–воздух–галогензамещенный углеводород из ряда C_2F_5H, C_2F_5Cl, C_2F_5I, $C_2F_4Br_2$, C_4F_{10}. Эксперименты проводились на установке “Вариант”, схема которой представлена на рис. 1. Установка предназначена для измерения КПР, максимального давления взрыва ΔP_{max} и максимальной скорости нарастания давления взрыва $(dP/dt)_{max}$ в диапазоне давлений 0.1–4.0 МПа. Относительная погрешность определения КПР, ΔP_{max} и $(dP/dt)_{max}$ не превышала 10%.

Реакционный сосуд установки – сфера из нержавеющей стали диаметром 20 см (объем 4.2 л). Газовые смеси зажигались в центре реакционного сосуда при помощи искрового источника зажигания с энергией 2 Дж. Распространение пламени регистрировалось по показаниям датчика давления “Сапфир-22” с постоянной времени 3×10^{-3} с, с записью на цифровом осциллографе. Принималось, что распространение пламени имеет место, если рост давления превышает 30 кПа.

Смеси требуемого состава создавались по парциальным давлениям непосредственно в предварительно вакуумированном до 0.5 кПа реакционном сосуде в следующем порядке: сначала в сосуд подавался галогензамещенный углеводород, затем водород, затем воздух до давления, равного атмосферному. После этого 10 минут отводилось на перемешивание смеси, а затем смесь зажигалась. В ходе эксперимента фиксировались ΔP_{max} и $(dP/dt)_{max}$. По полученным данным определялось значение КПР. Для каждой концентрации водорода и галогенсодержащего соединения опыт повторялся трижды.

При определении КПР использовались две методики: в первой (далее – методика 1) при фиксированном содержании H_2 в смеси концентрация галогензамещенного углеводорода в ней уменьшалась до значений, при которых начинает распространяться пламя. Во второй (далее – методика 2) при фиксированном содержании H_2 концентрация галогензамещенного углеводорода в смеси увеличивалась от 0 до значения, при котором распространение пламени в смеси прекращается.

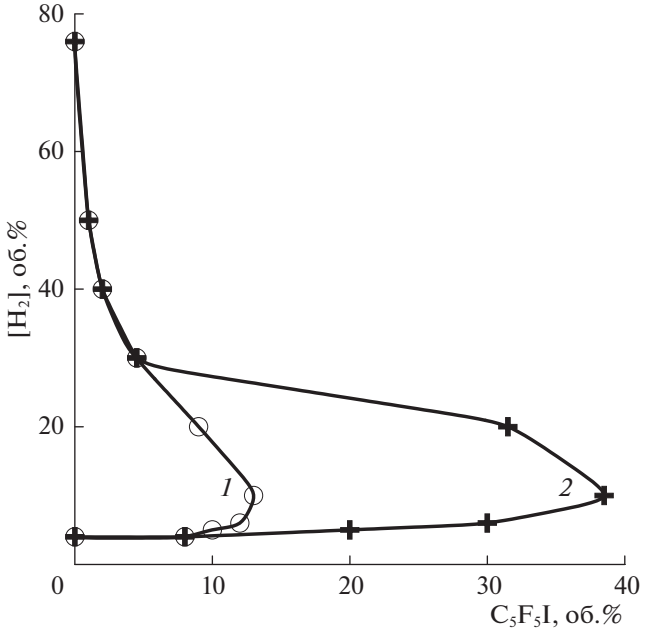


Рис. 2. Влияние состояния поверхности реакционного сосуда на область распространения пламени в смеси H_2–C_2F_5I–воздух; *1* – на поверхности сосуда находятся продукты горения указанной смеси, *2* – чистая поверхность реакционного сосуда.

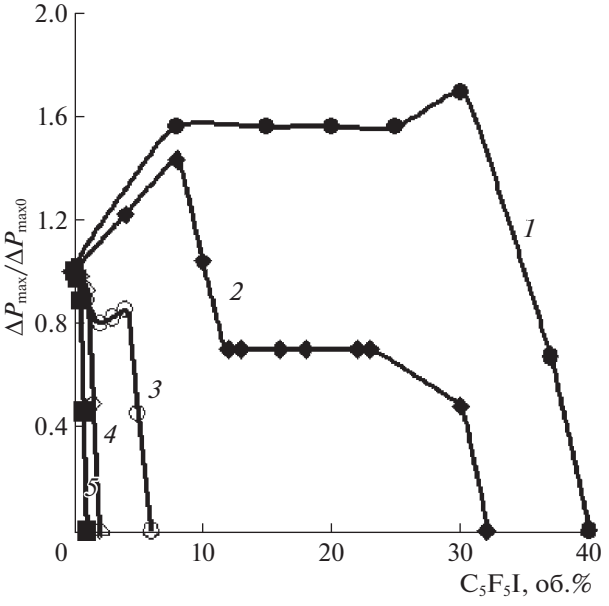


Рис. 3. Зависимости максимального давления взрыва водородовоздушных смесей от концентрации C_2F_5I. Концентрация водорода в воздухе 10 (*1*), 20 (*2*), 30 (*3*), 40 (*4*), 50 об. % (*5*).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По методикам 1 и 2 для смеси H_2 с C_2F_5I и воздухом были получены области распространения пламени, ограниченные кривыми *1* и *2* на рис. 2.

Очевидно, что две описанные методики дают очень сильно различающиеся результаты: значения МФК, определенные для C_2F_5I по ним, различаются почти в 3 раза (13 и 37.5 об. % соответственно). Это происходит из-за того, что в первом случае поверхность реакционного сосуда при определении предела распространения пламени чистая, а во втором загрязнена продуктами горения, образовавшимися в предыдущих опытах: на свече зажигания и на поверхности сосуда обнаруживается большое количество кристаллов йода, сильно увеличивающееся от эксперимента к эксперименту. При извлечении свечи зажигания из сосуда видно, как с ее поверхности поднимается темно-фиолетовый пар.

Состояние поверхности реакционного сосуда сказывается и на других характеристиках процесса горения. На рис. 3, 4 показано, как наличие на ней образовавшихся в предыдущих опытах продуктов горения влияет на изменение ΔP_{max} и $(dP/dt)_{max}$ для смесей H_2 с воздухом различного состава при добавлении C_2F_5I. Размерные нормировочные коэффициенты $\Delta P_{max\ o}$ = 290, 460, 640, 610, 520 кПа, $(dP/dt)_{max\ o}$ = 3, 6, 98, 155, 230, 240 МПа/с при $[H_2]$ = 10, 20, 30, 40, 50 об. % соответственно.

Видно, что при использовании методики 2, пока количество I_2 на стенках реакционного сосу-

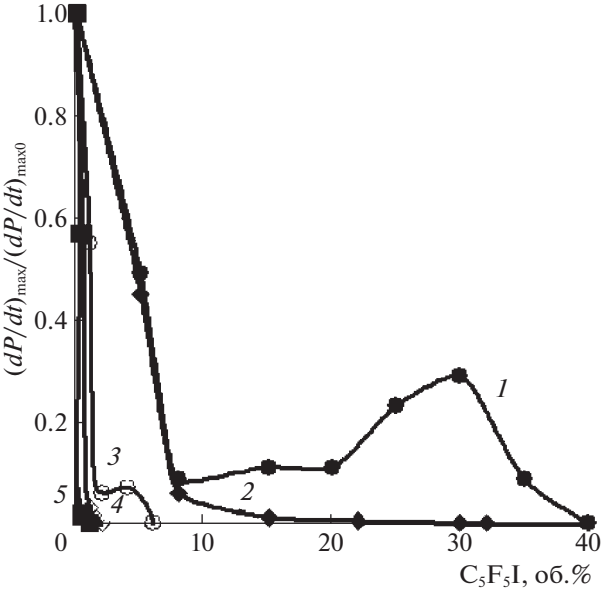


Рис. 4. Зависимости максимальной скорости нарастания давления взрыва водородовоздушных смесей от концентрации C_2F_5I. Концентрация водорода в воздухе 10 (*1*), 20 (*2*), 30 (*3*), 40 (*4*), 50 об. % (*5*).

Таблица 1. МФК различных ингибиторов горения смеси H_2–воздух

Ингибитор	C_2F_5I		C_2F_5H		C_2F_5Cl		$C_2F_4Br_2$		C_4F_{10}	
Методика	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
МФК, об. %	13.0	37.5	16.5	16.5	27.5	27.5	12.0	16.0	17.0	17.0
Источник данных	с.д.	с.д.	с.д.	с.д.	с.д.	с.д., [6]	с.д.	с.д., [8, 9]	с.д.	с.д.

Обозначения: с.д. – собственные данные.

да невелико, значения ΔP_{max} и $(dP/dt)_{max}$ уменьшаются. К 3–4 опыту на стенках накапливается существенное количество I_2, что для смесей с $[H_2] = 30$ об. % и менее приводит к возрастанию ΔP_{max} и $(dP/dt)_{max}$ при увеличении содержания C_2F_5I.

Аналогичные исследования были выполнены при добавлении в водородовоздушную смесь других галогенированных углеводородов; проведено сравнение результатов с имеющимися в литературе данными (табл. 1), из которого следует, что различия в значениях МФК, определенных по методикам 1 и 2, нет для галогенсодержащих веществ, в молекулу которых входят атомы фтора и хлора. Для йодированных и бромированных соединений есть существенные различия (значительно более сильные в случае иодида). При горении смеси H_2–$C_2F_4Br_2$–воздух на поверхности реакционного сосуда также оседает большое количество продуктов горения, в частности, HBr и Br_2.

Для объяснения полученных результатов можно предложить следующую трактовку. Известно [10], что высокая ингибирующая эффективность йодсодержащих углеводородов по отношению к горению водородсодержащих горючих определяется не столько актом первичного ингибирования по реакции вида

$$H + C_2F_5I = C_2F_5 + HI, \quad (1)$$

сколько последующей реализацией цикла с участием HI:

$$H + HI = H_2 + I, \quad (2)$$

$$H + I + M = HI + M, \quad (3)$$

где M – любая третья частица. Как уже отмечалось, при проведении экспериментов после вакуумирования реакционного сосуда и задания в нем новой смеси H_2–C_2F_5I–воздух, смесь выдерживалась в реакционном сосуде в течение 10 минут для перемешивания компонентов. При использовании методики 2 за это время с поверхности сосуда успевает испариться достаточно большое количество молекулярного йода (давление его насыщенных паров при температуре 293 K составляет 26.6 Па [11]). После зажигания смеси I_2 распадается на атомы по реакции

$$I_2 + M = I + I + M \quad (4)$$

вследствие небольшой энергии связи в молекуле I_2 (149.1 кДж [12]). Образовавшийся атомарный йод может участвовать в реакции

$$I + C_2F_5I = C_2F_5 + I_2. \quad (5)$$

Значимое влияние молекулярного йода на деструкцию йодсодержащих углеводородов хорошо известно. Впервые его промотирующая роль по отношению к распаду C_4H_9I показана в [12], причем, как следует из выполненного в [12] анализа, за промотирование ответственна последовательность реакций, аналогичных (4) и (5). Определяющая роль реакций типа (4) и (5) при пиролизе CH_3I, CF_3I, C_2F_5I и C_4F_9I при 500–700 K и атмосферном давлении установлена в [13, 14]. Учитывая значения энергии связи I–I и C–I в молекуле C_2F_5I (149.1 кДж [12] и 211.7 кДж [14] соответственно), можно ожидать, что при температурах 1000–1200 K, реализуемых при горении смеси водород–воздух, реакции (4) и (5) также окажутся существенными.

Однако, процесс (5), хотя и является конкурирующим по отношению к (1), не может привести к деактивации йодсодержащего ингибитора горения водорода, так как его скорость при температурах, реализующихся при горении, оказывается на несколько порядков меньше. Рассмотрим в качестве примера горение при начальном атмосферном давлении водородовоздушной смеси, содержащей 10 об. % H_2 и 4 об. % йодсодержащего ингибитора. Согласно [15], в пламени смеси 10 об. % водород – 90 об. % воздух при температуре 1000 K мольная доля атомарного водорода равна 5×10^{-3}; если смесь ингибирована 4 об. % CF_3I, мольная доля атомов йода в пламени при $T = 1000$ K составляет 8×10^{-5} [16]. По нашей оценке, выделение молекулярного йода со стенок реакционного сосуда максимально добавляет еще 5×10^{-3} к мольной доле атомов I. Поскольку для реакций (1) и (5) энергии активации равны $E_1 = 70.42$ кДж/ моль и $E_5 = 21.56$ кДж/моль, а значения предэкспоненциального множителя в выражении константы

скорости реакции составляют $k_1 = 10^{-11}$ см^3 молек$^{-1}$ с$^{-1}$ и $k_5 = 1.66 \times 10^{-9}$ см^3 молек$^{-1}$ с$^{-1}$ соответственно [14, 17], получаем для температуры 1000 K отношение их скоростей $w_5/w_1 \approx 1.7 \times 10^{-5}$.

Сравним теперь скорость регенерации HI в пламени (3) со скоростью процесса рекомбинации атомов йода

$$I + I + M = I_2 + M, \quad (6)$$

ответственного за образование молекулярного йода в реагирующей системе, который по завершении горения смеси H_2–воздух с добавкой ингибитора оседает на стенках реакционного сосуда. Используя для оценки кинетические параметры реакции (3) из работы [18] ($E_3 = 0$ кДж/моль, $k_3 = 1.3 \times 10^{-31}\left(\frac{T}{298}\right)^{-1.87}$ см^6 молек$^{-2}$ с$^{-1}$, где T – температура), а параметры реакции (6) – согласно [19] ($E_6 = 0$ кДж/моль, $k_3 = 9.93 \times 10^{-30}\left(\frac{T}{298}\right)^{-5}$ см^6 молек$^{-2}$ с$^{-1}$), получаем, что при наличии I_2 на стенках реакционного сосуда перед проведением опыта скорости процессов (3) и (6) при температуре 1000 K для случая горения смеси H_2–воздух–C_2F_4I, содержащей 10 об. % H_2 и 4 об. % ингибитора, соотносятся как $w_3/w_6 \approx 0.57$. Таким образом, реакция (6) оказывается способна эффективно конкурировать с процессом (3), разрушая образуемый реакциями (2), (3), цикл регенерации HI в пламени и тем самым значительно уменьшая эффективность ингибирования горения водорода в воздухе йодсодержащим веществом. Если же стенки реакционного сосуда перед проведением эксперимента чистые, для той же горючей смеси при той же температуре 1000 K $w_3/w_6 \approx 36.2$, т.е. реакция (3) доминирует по отношению к (6), и последняя не оказывает заметного влияния на цикл регенерации HI, что подтверждается данными [16]: I_2 в высокотемпературной зоне пламени не обнаруживается вплоть до приближения процесса горения к завершению, то есть когда концентрация атомарного водорода становится очень малой. В [16] также отмечается, что роль реакции (6) незначима только ввиду малости концентрации атомов I.

Бромсодержащие ингибиторы воздействуют на горение водородсодержащих веществ по схеме, аналогичной (1)–(3). В отличие от ситуации с воздействием на процесс горения дополнительного количества I_2, эффект влияния загрязненной бромсодержащими продуктами стенки реакционного сосуда на КПР водородовоздушных смесей в присутствии тетрафтордибромэтана объясняется последовательностью реакций

$$Br_2 + M = Br + Br + M, \quad (7)$$

$$Br + C_2F_4Br_2 = C_2F_4Br + Br_2, \quad (8)$$

последняя из которых способна конкурировать с процессом

$$H + C_2F_4Br_2 = C_2F_4Br + HBr, \quad (9)$$

тем самым снижая эффективность ингибирования тетрафтордибромэтаном горения водорода в воздухе. Поскольку для реакции (8) кинетические параметры неизвестны, воспользуемся для оценки сведениями по аналогичной реакции CF_3Br [20] ($E_8 = 24.3$ кДж/моль, $k_8 = 1.07 \times 10^{-10}$ см^3 молек$^{-1}$ с$^{-1}$). Согласно [21], для реакции (9) $E_9 = 22.37$ кДж/моль, $k_8 = 1.49 \times 10^{-11}$ см^3 молек$^{-1}$ с$^{-1}$. Тогда при $T = 1000$ K скорости реакций (8) и (9) соотносятся как $w_8/w_9 = 57.81\frac{[Br]}{[H]}$. Так как мольная доля атомов Br в пламени смеси 10 об. % H_2 – 90 об. % воздух, ингибированной 4 об. % CF_3Br, при $T = 1000$ K составляет 6×10^{-4} [16], с учетом данных [15] по концентрации атомов H и предполагая, что со стенок реакционного сосуда выделяется не меньше Br_2, чем I_2 при использовании йодсодержащего ингибитора, получаем, что $w_8/w_9 \approx 64.7$.

Используя кинетические данные [19], легко можно показать также, что выделение со стенки в реагирующую систему дополнительных количеств брома слабо влияет на соотношение скоростей реакций

$$H + Br + M = HBr + M, \quad (10)$$

$$Br + Br + M = Br_2 + M, \quad (11)$$

для тех же условий, при которых проводилось сравнение скоростей процессов (8) и (9) получаем при $T = 1000$ K, что при отсутствии дополнительного количества брома в реагирующей системе $w_{10}/w_{11} \approx 1.0$, а при его наличии $w_{10}/w_{11} \approx 0.89$.

Таким образом, испаряющийся со стенок реакционного сосуда молекулярный бром, уменьшая эффективность ингибирования при помощи $C_2F_4Br_2$, не оказывает заметного влияния на существенно более значимый с точки зрения подавления процесса горения цикл с участием HBr. В результате эффект влияния стенки выражен значительно слабее, чем в случае йодистого ингибитора.

Аналогичным образом можно объяснить и явление расширения верхнего концентрационного предела распространения пламени бромистого этила в воздухе, обнаруженное в работе [4] в случае, когда стенки реакционного сосуда загрязнены продуктами горения C_2H_5Br. Выделяющийся

по реакции (7) атомарный бром взаимодействует с C_2H_5Br:

$$Br + C_2H_5Br = C_2H_5 + Br_2 + 61.3\ кДж, \qquad (12)$$

уменьшая тем самым возможности для осуществления акта самоингибирования горения бромистого этила

$$H + C_2H_5Br = C_2H_5 + HBr - 84\ кДж. \qquad (13)$$

Так как для реакции (12) E_{12} = 24.3 кДж/моль, $k_{12} = 1.07 \times 10^{-10}$ см^3 молек$^{-1}$ с$^{-1}$ [20], а для процесса (13) E_{13} = 22.37 кДж/моль, $k_8 = 1.49 \times 10^{-11}$ см^3 молек$^{-1}$ с$^{-1}$ [22], при температуре T = 1000 K скорости реакций (12) и (13) соотносятся как $w_{12}/w_{13} = 0.12\dfrac{[Br]}{[H]}$. Мольная доля атомов водорода в пламени смеси бромистого этила с воздухом неизвестна, но, согласно [23], для богатых околопредельных смесей этана или пропана с воздухом она не превышает 2×10^{-4}. Предполагая, что со стенок реакционного сосуда выделяется не меньше Br_2, чем молекулярного йода в описанном выше случае использования йодсодержащего ингибитора, получаем, что $w_{12}/w_{13} \approx 0.37$.

Таким образом, экспериментальные результаты, полученные в данной работе и известные из других источников, показывают значительное промотирующее влияние поверхности реакционного сосуда, загрязненной бромом или йодом, на горение газовых смесей, содержащих бром- или йодзамещенные углеводороды. При наличии Br_2 или I_2 на поверхности реакционного сосуда наблюдается снижение ингибирующей эффективности бром- и йодсодержащих веществ по отношению к горению смесей H_2–воздух, а также ослабление самоингибирования горения C_2H_5Br в смеси с воздухом, приводящее к расширению КПР. Эффект промотирования сильнее для йодированных веществ. Согласно выполненному анализу известных кинетических данных, экспериментально наблюдаемая картина объясняется уменьшением роли цикла регенерации HI при ингибировании йодированным углеводородом горения водорода в воздухе при наличии поступающих со стенки реакционного сосуда дополнительных количеств I_2; испарившийся со стенки Br_2, обеспечивая появление в реагирующей системе дополнительного атомарного брома, снижает скорость реакций бромированных углеводородов с атомами H, уменьшая эффективность подавления ими горения смеси H_2–воздух, а также сокращая возможности реализации акта самоингибирования при горении C_2H_5Br в воздухе.

Работа проводилась при поддержке Фонда содействия инновациям и по программе “УМНИК” по договорам № 17482ГУ/2022 от 26 апреля 2022 г. и № 16371ГУ/2021 от 25 мая 2021 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баратов А.Н.* Горение – Пожар – Взрыв – Безопасность. М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. 364 с.
2. *Копылов П.С., Елтышев И.П.* // Актуальные проблемы пожарной безопасности: тез. докл. XXX Междунар. науч.-практ. конф. М: ВНИИПО. 2018. С. 415.
3. *Копылов С.Н.* Пожаровзрывобезопасность. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. 102 с.
4. *Макеев В.И., Голиневич Г.Е., Глухов И.С.* // Пожарная профилактика. М.: ВНИИПО, 1977. С. 24.
5. *Dixon-Lewis G.* // Proceedings of Royal Society (London). 1996. A452. P. 1857.
6. *Shebeko Yu.N., Azatyan V.V., Bolodyan I.A. et al.* // Combustion and Flame. 2000. V. 121. P. 542.
7. *Денисов Е.Т., Азатян В.В.* Ингибирование цепных реакций. М.: Изд-е РАН. 1997. 288 с.
8. *Баратов А.Н.* // сб. Проблемы горения и тушения. М.: ВНИИПО, 1968. С. 32.
9. *Азатян В.В., Айвазян Р.Г., Калачев В.И. и др.* // Хим. физика. 1998. Т. 17. № 2. С. 117
10. *Kopylov S.N., Kopylov P.S., Yeltyshev I.P. et al.* // IOP Conference Series: Earth Environmental Science. 2021. V. 666. P. 022011.
11. *Киреев С.В., Шнырев С.Л.* Современные методы оптической спектроскопии технологических сред. М.: Изд-во Юрайт, 2019. 147 с.
12. *Семенов Н.Н.* О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 354 с.
13. *Васильева Н.А., Кочубей Д.И., Буянов Р.А. и др.* // Кинетика и катализ. 1982. Т. 23. С. 486.
14. *Скоробогатов Г.А., Дымов Б.П., Хрипун В.К.* // Там же. 1991. Т. 32. С. 252.
15. *Shvartzberg V.M., Bolshova T.A., Korobeinichev O.P.* // Energy Fuels. 2010. V. 24. P. 1552.
16. *McIlroy A.* // Proceedings of Halons Technical Options Working Conference. Albuquerque: University of New Mexico, 1996. P. 247.
17. *Varga T., Zsely I.G., Turanyi T. et al.* // Intern. J. on Chemical Kinetics. 2014. V. 46. P. 295.
18. *Лифшиц А., Тамбуру С., Дубникова Ф.* // Журн. физ. химии. 2008. Т. 112. С. 925.
19. *Baulch D.L., Duxbury J., Grant S.J. et al.* // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1981. V. 10. P. 1.
20. *Кондратьев В.Н.* Константы скорости газофазных реакций. М.: Наука, 1970. 351 с.
21. *Петрова Л.Д., Азатян В.В., Баратов А.Н. и др.* // Изв. АН СССР, сер. хим. 1976. Т. 25. С. 879.
22. *Armstrong N., Simmons R.F.* // Proceedings of International Symposium on Combustion. 1973. 14. P. 443.
23. *Peters N., Rogg B.* Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems. Berlin: Springer, 1993. 360 p.