

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПРОПАНО- И МЕТАНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

A. С. Клименко, И. И. Кондрашова, А. М. Рывкин, Н. А. Шварцман

(Москва)

В практике пожаро- и взрывозащиты существуют условия, когда на одном объекте необходимо предотвратить распространение как двухстадийного пламени, появляющегося при низкотемпературном воспламенении, так и горячего пламени, возникающего в результате искрового зажигания. Двухстадийное пламя отличается от горячего тем, что первой стадией его является холодное пламя, поэтому проблема состоит в создании высокоэффективного комплексного средства гашения двух типов пламен. Один из способов решения этой задачи сводится к приготовлению смеси двух ингибиторов, каждый из которых эффективен для одного типа пламени.

В [1] на примере влияния ингибиторов на концентрационные пределы распространения пламени при зажигании горючей смеси серией искр снизу в вертикальной трубе показано, что $C_2F_4Br_2$ — тетрафтордибромэтан (4F) и трифторметан (3F) являются эффективными ингибиторами. Так, концентрация 4F и 3F в мысе полуострова распространения пламени паров топлива Т-1 с воздухом составляет 300 и 370 мг/дм³ соответственно. В [2] на основании опытов, выполненных капельным методом, высказано предположение, что 4F и 3F малоэффективны при ингибировании двухстадийного пламени, поскольку для предотвращения воспламенения паров топлива Т-1 в воздухе требуется 540 4F и 900 мг/дм³ 3F.

Из литературы известно, что эффективными ингибиторами холодно-пламенного и двухстадийного воспламенения являются аминосоединения [3], но авторам неизвестны работы по влиянию 4F и 3F на двухстадийное горение.

В [4] рассмотрено влияние смеси таких ингибиторов обоих типов пламен, как 4F и диэтиламин (ДЭА), на смещение верхнего концентрационного предела некоторых углеводородов. Авторы обнаружили, что эквимолярная смесь ингибиторов смещает предел эффективнее суммарного действия ингибиторов, взятых в количествах, содержащихся в смеси. Отношение отклонений от верхнего концентрационного предела предельных концентраций топлив сравниваемых смесей, большее единицы, рассматривается в [4] как количественное выражение синергизма при ингибировании (истинный синергизм). Синергизм объясняется наличием в определенном интервале температур и концентраций «холодного пламени, расположенного в передней части зоны горения» обычного пламени, сформированного при зажигании.

Обработка результатов [4] показывает, что объемное содержание 4F в мысе полуострова распространения пламени бензоло-воздушной смеси при комнатной температуре составляет ~6,0%, а по данным [5] — 2,5%. Расхождение с литературными данными наблюдается и в зависимости предельной концентрации 4F от начальной температуры смеси: по данным [6, 7] с ростом температуры она растет, а по данным [4] для бензола падает. Совсем странно выглядит величина верхнего концентрационного предела для пламени гептано-воздушной смеси, полученная на той же установке, что и в [4], и равная 12% [8], вместо принятого в литературе значения 6,7% [9, 10]. Эти расхождения, по-видимому, связаны с дефектами методики, которая существенно отличается от модификаций стандартной методики [9], широко применяемой для исследования предельных явлений. Кроме того, с нашей точки

зрения результаты этой работы находятся в противоречии с выдвинутой концепцией. Так, для бензоло-воздушных смесей обнаружено синергетическое смещение верхнего предела, хотя известно [11], что склонность бензола к холоднопламенному воспламенению выражена слабо, а для циклогексано-воздушной смеси, имеющей холоднопламенную область [12], этот эффект практически отсутствовал.

В [13] исследовалось влияние эквимолярной смеси 4F и ДЭА на концентрационные пределы пламени водородно-воздушной смеси. Установлено, что истинный синергизм отсутствует, а смесь смещает пределы лучше наиболее эффективного ингибитора этой пары (практический синергизм). Полученный эффект нельзя объяснить с позиций, выдвинутой в [4], поэтому авторы сделали предположение, что атомы брома, образующиеся в результате актов ингибирования, реагируют с молекулами второго компонента смеси. Такое объяснение синергизма для пламени водорода вполне возможно, однако в случае реализации такого механизма в пламенах углеводородных топлив синергизм должен иметь место, по-видимому, для всех углеводородов.

Критерий истинного синергизма, предложенный в [4, 13], как «наиболее жесткий» [13], принят авторами без обоснования и представляется произвольным. Он может быть применим, когда верхний предел смещается пропорционально количеству вводимого ингибитора, что у 4F и у ДЭА, а также у большинства галоидоуглеводородов не наблюдается. Поскольку при отсутствии пропорциональности теоретическая эффективность смесевого ингибитора в зависимости от соотношения компонентов смеси может быть и выше эффективности лучшего ингибитора и ниже эффективности худшего, критерий практического синергизма, как «менее жесткий» [13], также теряет смысл.

Таким образом, нет никакой ясности в вопросе влияния смеси, состоящей из полностью замещенного бромсодержащего галоидоуглеводорода и аминосоединения различного состава, на концентрационные пределы распространения пламен углеводородных топлив, также в вопросе критериев синергизма при ингибировании. Поэтому для получения достоверной информации о действии смесевого ингибитора на концентрационные пределы распространения пламени и с целью формулировки критерия его эффективности проведены опыты по определению оптимальных соотношений компонентов смеси, при которых достигается наибольший ингибирующий эффект в пламенах различных топлив, на установке, близкой к стандартной.

В качестве ингибитора горячего пламени выбран 4F — наиболее эффективный из бромсодержащих алкилгалогенидов, а в качестве ингибитора двухстадийного пламени выбран $C_6H_5NH_2$ — анилин (A) — один из самых эффективных среди аминосоединений [3]. В связи с выдвинутой в [4] концепцией опыты проводились на пропано-воздушных смесях, имеющих область холоднопламенного и двухстадийного воспламенения [14], и на метано-воздушных смесях, которые не имеют такой области [11].

Для проверки высказанного в [2] предположения о низкой эффективности 4F и 3F как ингибиторов двухстадийного пламени определено влияние 3F и A на область холоднопламенного и двухстадийного воспламенения топлива Т-1. Эта часть работы выполнена методом впуска горючей смеси в терmostатированный реакционный кварцевый сосуд объемом 0,4 дм³ из форкамеры объемом 1,0 дм³, причем оба сосуда размещались в шкафу, терmostатированном при $130 \pm 3^\circ\text{C}$. Давление в реакционном сосуде измерялось датчиком ДД-10, а температура — вольфрам-рениевой термопарой, сваренной из проволоки диаметром 0,025 мм. В фотокамере по парциальным давлениям готовилась смесь паров Т-1 с воздухом и ингибитором, которая затем за 0,18 с перепускалась в реакционный сосуд. За температуру воспламенения принималась

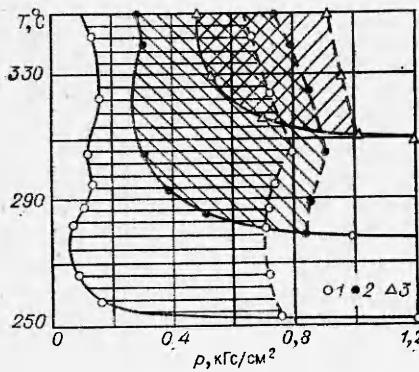


Рис. 1. Влияние анилина и тетрафтордибромэтана на область холодногопламенного и двухстадийного воспламенения смеси 5,0% паров топлива Т-1 с воздухом (заштрихована область холодных пламен).
1 — горючая смесь без добавки; 2 — с добавкой 30,0% CF₃Br; 3 — с добавкой 2,0% C₆H₅NH₂.

минимальная температура внутренней стенки сосуда, при которой происходило воспламенение. Неравномерность профиля температуры по длине сосуда составляла $\pm 1,0^\circ$.

Основная часть работы по определению влияния 4F и A и их смесей

на концентрационные пределы проводилась в закрытой кварцевой трубе стандартных размеров: диаметр 55 мм и длина 1,2 м. Горючая смесь составлялась по парциальным давлениям в камере, снабженной вентилятором, перемещивалась и перепускалась в трубу, из которой эвакуирован воздух. Температура в трубе и камере составляла $180 \pm 2,0^\circ\text{C}$. Время пребывания горючей смеси при этой температуре до зажигания не превышало 2 мин. Хроматографический анализ проб показал, что заметного превращения топлива и ингибитора при этих условиях не происходит. Смесь зажигалась снизу серией искр от катушки КМД-224. Материал электродов — нержавеющая сталь диаметр 3 мм, расстояние между электродами 7 мм. Опыты проводились при начальном давлении в трубе 0,45 кГс/см². За предельную принималась концентрация ингибитора, при которой фронт пламени распространялся на 0,4—0,5 м. Эта концентрация определялась с точностью $\pm 0,1\%$.

В первой серии опытов установлено, что минимальная температура двухстадийного воспламенения паров топлива Т-1 составляет 252°C (рис. 1). При добавлении в смесь 30% 3F температура поднялась лишь на 21° . В то же время в горючую смесь достаточно добавить 2,0% A, чтобы поднять ее на 58° . Таким образом, эти данные подтверждают предположение, что полностью замещенные бромсодержащие галоидоуглеводороды малоэффективны, как ингибиторы низкотемпературного горения по сравнению с аминосоединениями.

Данные по влиянию 4F и A и их смесей на концентрационные пределы распространения пламени пропано- и метано-воздушных смесей приведены на рис. 2. Видно, что эффективность смесевых ингибиторов на верхнем пределе и в мысе полуострова для пламени пропана выше, а для пламени метана ниже, чем эффективность 4F — наиболее сильно-го ингибитора смеси.

Более наглядно различия в действии 4F и A на пламена пропано- и метано-воздушных смесей можно выявить, если результаты экспериментов обработать по правилу Ле-Шателье в относительных координатах, что позволяет наблюдать отклонения от аддитивности. По этому правилу, выведенному для нижнего концентрационного предела [15] и распространенному на верхний предел, в смеси предельного состава

$$\sum \gamma_i = 1,$$

где $\gamma_i = n_i/N_i$ — относительная концентрация; N_i — предел для i -го компонента; n_i — его концентрация.

Анализу причин отклонения от правила Ле-Шателье посвящены работы [16—18]. Одна из причин отклонения, по мнению авторов [16, 17], состоит в селективном выгорании одного из компонентов смеси [19], другая причина — в химическом взаимодействии компонентов. Так, например, в [17, 18] установлено, что малые количества метана и водорода оказывают ингибирующее и промоториующее действие на горе-

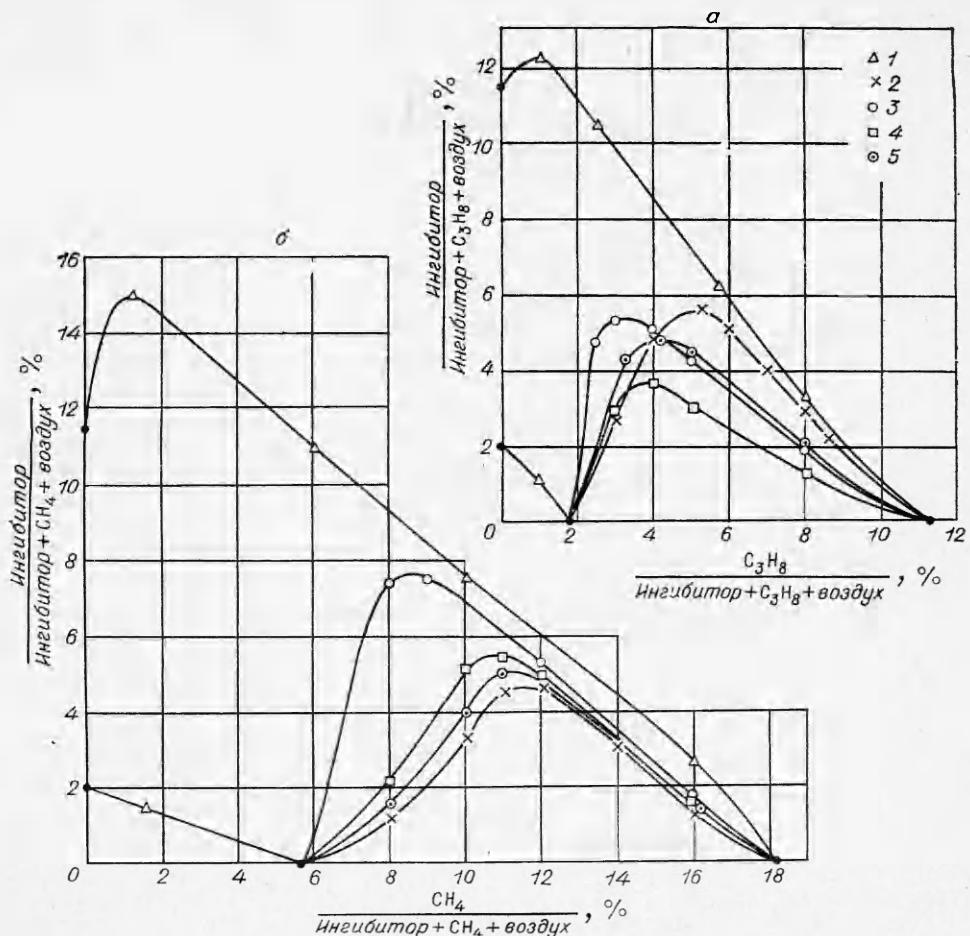


Рис. 2. Влияние анилина и тетрафтордибромэтана и их смесей на концентрационные пределы распространения пламени пропано- (а) и метано-воздушных (б) смесей при температуре 180°C и давлении 0,45 кГс/см².
 а) 1 — А, 2 — 4 F, 3 — 70% 4 F+30% А, 4 — 80% 4 F+20% А, 5 — 87% 4 F+13% А; б) 1 — А, 2 — 4 F, 3 — 60% 4 F+40% А, 4 — 80% 4 F+20% А, 5 — 90% 4 F+10% А.

ние водородно-метано-воздушных (кислородных) смесей. В некоторых случаях отклонение от правила объясняется одновременным действием обеих причин [17].

Распространение правила Ле-Шателье на вещества и их смеси, не имеющие пределов в воздухе, и перестройка предельных кривых в соответствии с этим правилом в относительных координатах осуществлялись, как в [20, 21], на основе предположения, что минимум верхний предел этих веществ в воздухе возникает при экстраполяции прямолинейного участка предельной кривой к нулевой концентрации топлива.

На рис. 3 представлены перестроенные в относительных координатах некоторые данные рис. 2. Видно, что кривая 1, соответствующая предельной кривой для пары метан — А, расположена выше аддитивной прямой. Формально это означает, что один из компонентов смеси оказывает промотирующее действие. Однако можно предположить, что фактически имеет место квазипромотирование на протяжении большей части кривой, обусловленное селективным выгоранием. Малые количества метана (до $\gamma_t=0,07$), по-видимому, промотируют окисление А, а затем начинается селективное выгорание метана. Аналогичная картина наблюдается для пары пропан — А (см. рис. 3, 2) до $\gamma_t=0,65$: малые количества пропана (до $\gamma_t=0,1$) промотируют горение А, а затем начинается

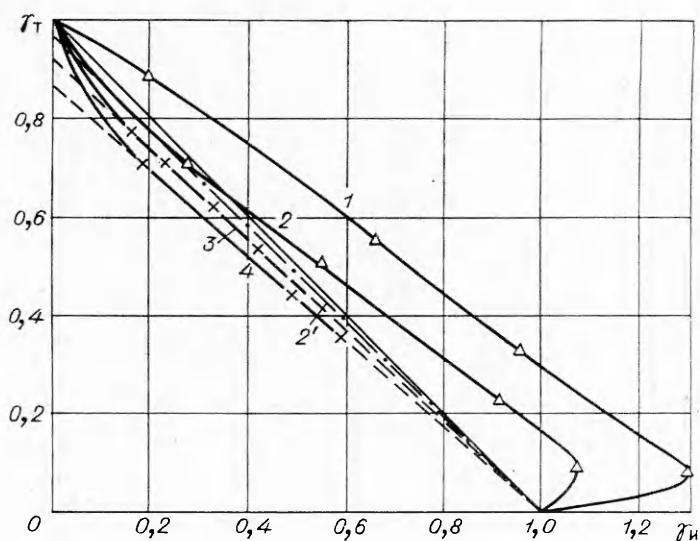


Рис. 3. Зависимость γ_t от γ_i в воздушных смесях.
1 — $\text{CH}_4\text{—C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$; 2 — $\text{C}_3\text{H}_8\text{—C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$; 3 — $\text{C}_3\text{H}_8\text{—C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$; 4 — $\text{C}_3\text{H}_8\text{—80\%}$
 $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2 + 20\% \text{ C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$.

селективное выгорание пропана. Различие с кривой 1 состоит в том, что при $\gamma_t < 0,35$ А оказывает ингибирующее действие на горение пропана. Не исключено, что все эти процессы протекают не последовательно, а одновременно, т. е. на селективное выгорание метана и пропана в присутствии А, которое на протяжении кривых 1 и 2 (см. рис. 3) проявляется в разной степени, накладывается ингибирующее действие малых количеств А только для пропана и промотирующее — малых количеств метана и пропана.

4F оказывает ингибирующее действие на смещение верхнего предела пламени пропана, так как кривая 3 на рис. 3 расположена ниже аддитивной прямой. Нелинейный участок этой кривой соответствует малым концентрациям 4F, оказывающим наибольший ингибирующий эффект. Аналогичный вид имеет кривая смещения верхнего предела метана с помощью 4F, однако отклонение от аддитивности для нее выражено слабо. Если линейный участок кривой 3 экстраполировать к нулевой концентрации ингибитора, то получим величину отклонения от аддитивности, которую авторы [17] трактуют как глубину ингибиравания, $\Delta\gamma_{4F} = 0,06 + 0,015$ для пропана и $\Delta\gamma_{4F} = 0,04 + 0,02$ для метана. Фактически сопоставление ингибиторов по величине $\Delta\gamma$ выполнено в [20—22]. Для пламени водородно-воздушной смеси установлено, что ингибирующая эффективность соединений различных классов растет в следующей последовательности: $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$, $(\text{CH}_3)_4\text{Pb}$, $(\text{CH}_3)_4\text{Sn}$, $[\text{H}_2\text{Se}, (\text{CH}_3)_2\text{Se}, (\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{Se}]$, $(\text{CH}_3)_2\text{Te}$ (для всех соединений селена $\Delta\gamma$ равны). В [17] также отмечено, что для однотипных ингибиторов глубины ингибиравания равны. Сравнение этих результатов с данными [18] подтверждает известные выводы о том, что в кислородных пламенах галоидоуглеводороды менее эффективны, чем в воздушных, и хлорсодержащие углеводороды менее эффективны, чем бромсодержащие.

Складывается впечатление, что метод сравнения по величине $\Delta\gamma$ применим для соединений различных классов, ингибирующих горение таких топлив, у которых малые количества ингибитора существенно и в разной степени смещают верхний предел, например у водорода. Для углеводородных топлив, горящих в воздухе, сравнение ингибиторов по величине $\Delta\gamma$ возможно при высокой точности эксперимента, так как даже для 4F (одного из наиболее эффективных пламегасителей) эта величина

в пламени пропана и метана мала и не превышает, как показано выше, 0,06.

Далее, из рис. 3 видно, что у пропано-воздушных смесей существует зона $\gamma_A < 0,35$ (4,0%), в которой 4F и A оказывают ингибирующее действие, в то время как у метано-воздушных смесей такой зоны нет. Это позволяет предположить, что только в пламенах пропана при концентрации A меньше 4,0% можно ожидать повышение ингибирующей эффективности смеси. Действительно, для кривой 4, соответствующей пределу распространения пламени для пары пропан — смесь 80% 4F + 20% A, $\Delta\gamma_{4F+A} = 0,13 \pm 0,03$, что превышает $\Delta\gamma$ компонентов смеси. В этом случае критерием синергизма будет наличие отклонения $\Delta\gamma$ от аддитивной суммы $\Delta\gamma_{4F}$ и $\Delta\gamma_A$; $\Delta\gamma_{4F+A}^{\text{адд}} = 0,053 \pm 0,014$ при условии, что за $\Delta\gamma_A$ принята величина отклонения от аддитивности точки пересечения касательной к кривой 2 (кривая 2') с осью ординат ($\Delta\gamma_A = 0,025 \pm 0,01$). Если $\Delta\gamma_{4F+A} - \Delta\gamma_{4F+A}^{\text{адд}}$ отнести к $\gamma_{4F+A}^{\text{адд}}$, то эта величина будет количественным выражением синергизма и по аналогии с [17] может быть названа глубиной синергизма. Положительное значение $\Delta\gamma_c$ означает синергетическое ингибирование ($\Delta\gamma_c = 0,08 \pm 0,05$). Точность выполненных экспериментов не позволяет достоверно судить о величине $\Delta\gamma_c$ для двух других смесей (см. рис. 2, a).

Обработка данных, представленных на рис. 2, б в относительных координатах, показывает, что для метана значения $\Delta\gamma_{4F+A} < \Delta\gamma_{4F} = 0,04$. Исходя из сказанного, а также учитывая, что A не ингибирует горение метана, и для этой пары (см. рис. 3, 1) следует говорить о какой-то глубине промотирования, которую, однако, не представляется возможным определить, можно считать, что $\Delta\gamma_c$ для метана либо равна нулю, либо имеет отрицательное значение. Таким образом, определение величины $\Delta\gamma_c$ для 4F и A в пламенах пропана и метана затруднено. Тем не менее интерпретация экспериментальных результатов в относительных координатах на рис. 3 целесообразна тем, что становится возможным сравнивать ингибиторы и их смеси по величине $\Delta\gamma$. Условность $\Delta\gamma_c$ в рамках этой методики, помимо неопределенности в величине $\Delta\gamma_A$, состоит в том, что существует необходимость рассматривать смесь 4F и A как простое вещество с мнимым верхним пределом в воздухе.

Для устранения этой условности и получения более достоверной информации о величине синергетического действия смесей 4F и A на пламена пропана и метана экспериментальные результаты представлены в виде зависимости предельных концентраций смесей от соотношения ингибиторов (рис. 4). Для наглядности на график нанесены расчетные значения аддитивно сложенных предельных концентраций ингибиторов, полученных в эксперименте и рассчитанных по правилу Ле-Шателье. Из рис. 4, a видно, что кривая 2, соответствующая концентрациям ингибиторов и их смесей, смещающим верхний предел распространения пламени пропана на 35%, расположена ниже кривой 2', что свидетельствует об усилении ингибирующего эффекта во всем диапазоне соотношений ингибиторов и указывает на наличие синергизма. Линия 1, соответствующая концентрациям ингибиторов и их смесей в мысе полуострова распространения пламени пропана, расположена как ниже, так и выше кривой 1'. В отличие от этих линий аналогичные кривые для метана (см. рис. 4, б, 1 и 2) полностью расположены выше кривых 1' и 2'. Если экспериментальные кривые расположены выше линии аддитивного сложения предельных концентраций ингибиторов, то формально имеет место синергетическое промотирование, если ниже аддитивной линии, то — синергетическое ингибирование. Так выглядит качественная сторона процесса.

Количественное понятие синергизма, как отмечалось, следует рассматривать с учетом отклонения от правила Ле-Шателье (см. рис. 4, 1'', 2''). С этой целью целесообразно ввести параметр $\Delta\gamma_c$, который опре-

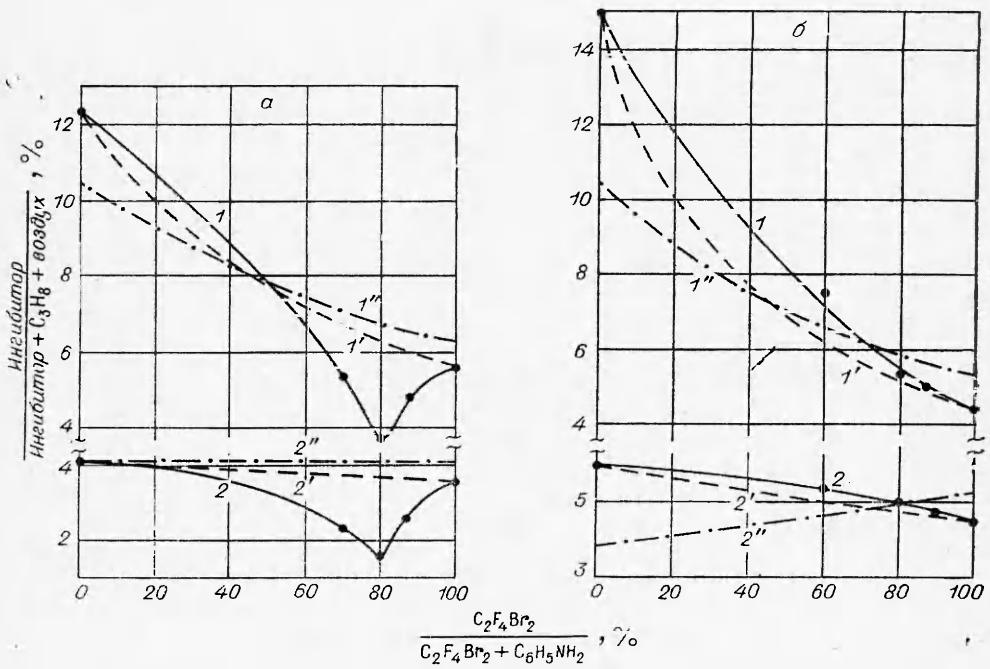


Рис. 4. Зависимость предельной концентрации анилина и тетрафтордигромэтана в пропано- (а) и метано-воздушных (б) смесях различного состава от соотношения ингибиторов.

1 — предельные концентрации в мысах полуостровов распространения пламени; 2 — предельные концентрации, соответствующие смещению верхнего предела на 35%. 1', 2', 1'', 2'' — расчетные значения аддитивно сложенных предельных концентраций ингибиторов, полученных графически и по правилу Ле-Шателье и в эксперименте соответственно.

деляется для данной смеси 4F и A как отношение разности величины аддитивной суммы предельных концентраций ингибиторов (см. рис. 4, 1', 2') и экспериментальной величины (см. рис. 4, 1, 2) к величине аддитивно сложенных предельных концентраций ингибиторов, полученных графически по правилу Ле-Шателье (см. рис. 4, 1'', 2''). При положительном значении величины $\Delta\gamma_c$ имеет место синергетическое ингибирование, при отрицательном значении — квазисинергетическое промоторование, обусловленное селективным выгоранием пропана или метана в присутствии анилина, на которое накладывается ингибирующее действие 4F.

На рис. 5 приведены рассчитанные из данных рис. 4 значения $\Delta\gamma_c$ в зависимости от соотношения ингибирующих компонентов смеси. Видно, что для кривой 2, соответствующей содержанию смесевых ингибиторов в мысах полуостровов распространения пламени пропано-воздушных смесей, наблюдается синергетическое ингибирование только при определенном соотношении ингибиторов. Любая кривая, построенная для случая смещения смесевым ингибитором верхнего предела пламени пропана, больше чем на 35%, будет иметь вид, аналогичный кривой 2. Величина смещения предела на 35% совпадает с концентрацией пропана, соответствующей точке пересечения кривой 2 с аддитивной прямой (см. рис. 3), поэтому для кривой 1 рис. 5, соответствующей смещению предела пламени пропана на 35%, и для любой другой кривой, отражающей смещение предела на меньшую величину, синергетическое ингибирование будет возникать при любом соотношении ингибиторов, поскольку содержание A в этих смесях не больше 4%. Таким образом, в пламени пропано-воздушных смесей определенного состава имеет место синергетическое ингибирование только при определенном соотношении 4F и A, в отличие от пламен метано-воздуш-

ных смесей, для которых этот эффект отсутствует при любой концентрации метана и любом соотношении ингибиторов (см. рис. 5, 3, 4).

Ограниченнность экспериментальных данных по рассматриваемому вопросу не позволяет достоверно судить о причинах синергетического ингибирования в пламенах пропана и его отсутствии в пламенах метана. Если бы в пламени пропана наблюдался механизм синергетического ингибирования, предложенный в [13] для пламени водорода, то он имел бы место и в пламени метана, так как нет никаких противопоказаний для его реализации в пламенах любых углеводородных топлив. Поскольку в пламенах метана этого эффекта не обнаружено, можно предположить, что в пламенах углеводородных топлив такой механизм не реализуется. Хотя формально полученные данные не противоречат концепции, выдвинутой в [4], но наличие холодного пламени перед горячим при искровом зажигании представляется маловероятным и пока в литературе нет данных, подтверждающих этот вывод. В то же время нельзя исключить, что при недостатке в горючей смеси кислорода в зоне предварительного подогрева пламени идут процессы, частично схожие с теми, которые реализуются в индукционный период, предшествующий холоднопламенному воспламенению, поскольку диффузия атомов и радикалов в зону предварительного подогрева пламени существенным образом искажает эти процессы. Компоненты смеси избирательно действуют на низкотемпературный и высокотемпературный механизмы, что и является в конечном счете возможной причиной синергизма.

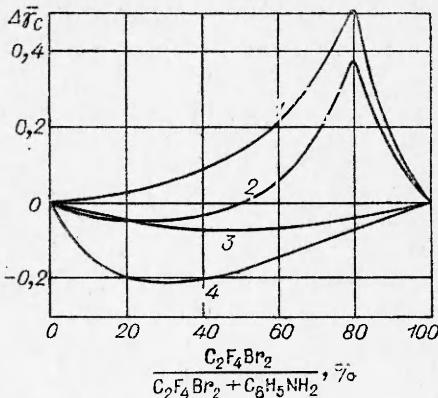


Рис. 5. Зависимость глубины синергизма от соотношения ингибиторов для пламен пропана (1, 2) и метана (3, 4).

1, 3 — предельные концентрации, соответствующие смещению верхнего предела на 35%;
2, 4 — предельные концентрации в мысах полуостровом распространения пламени.

Поступила в редакцию
26/VI 1978

ЛИТЕРАТУРА

- И. М. Абдурагимов, М. И. Порсов и др. Проблемы горения и тушения. Ч. II. М., ВНИИПО, 1974.
- И. М. Абдурагимов, Г. Я. Дрикер и др.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
- C. F. Cullis, J. M. Holwill, R. T. Pollard. 13-th Symposium (International) on Combustion. Pittsburgh, 1971, p. 195.
- С. П. Новикова, Б. В. Каргинский, Г. И. Кандопуло. Матер. совещания по механизму ингибирования цепных газовых реакций. Алма-Ата, Каз. ГУ им. С. М. Кирова, 1971.
- В. М. Кучер. Пожарная профилактика. Вып. 2. М., Стройиздат, 1964.
- R. C. Downing, N. J. Eichman, J. E. Malcolm. Nat. Fire Prot. As. Quarterly, 1951, 45, 2, 110.
- Н. А. Шварцман. Канд. дис. Каз. ГУ им. С. М. Кирова, Алма-Ата. 1972.
- Г. И. Кандопуло, С. П. Новикова. Матер. совещания по механизму ингибирования цепных газовых реакций. Алма-Ата, Каз. ГУ им. С. М. Кирова, 1971.
- H. F. Coward, G. W. Jones. US. Bur. of Mines Bull., 1952, 503, p. 131.
- M. G. Zabefakis. US. Bur. of Mines Bull., 1965, 627, p. 115.
- А. С. Соколик. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М., Изд-во АН СССР, 1960.
- С. А. Янтовский. Самовоспламенение газов и паров. Справочные материалы. М., Изд-во ОНТИ ГИАП, 1966.

13. Б. В. Карпинский, Ю. А. Рябиков и др.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
14. В. Иост. Взрывы и горение в газах. М., ИЛ, 1952.
15. А. И. Розловский. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. М., «Химия», 1972.
16. В. А. Бунев, В. С. Бабкин. ФГВ, 1973, 9, 4, 605.
17. В. А. Бунев, В. С. Бабкин. ФГВ, 1975, 11, 1, 135.
18. Avap Tiggelen. Tech. Doc. Rep., RTD-TDR-63-4011, 1963.
19. К. Бейли. Торможение химических реакций. М.—Л., Госхимиздат, 1940.
20. У. Тапака, У. Нагаи. Proc. Imp. Acad. Japan, 1926, 2, 6, 280.
21. У. Нагаи. Proc. Imp. Acad. Japan, 1926, 2, 6, 284.
22. У. Тапака, У. Нагаи. Proc. Imp. Acad. Japan, 1926, 2, 9, 494; 1927, 3, 6, 348; 1927, 3, 7, 434.

К ДЛИНОВОЛНОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛАМИНАРНОГО ФРОНТА ПЛАМЕНИ ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

П. П. Лазарев, А. С. Плещанов

(Москва)

Влияние внешнего электрического поля на распространение пламени рассматривалось в работах [1, 2], где дана обширная библиография. В [1—4] приводятся данные, согласно которым электрическое поле может оказывать разнообразное воздействие на устойчивость ламинарного фронта пламени. Цель настоящей работы — дать общую постановку электрогидродинамической задачи.

Уравнения гидродинамики для несжимаемой невязкой жидкости в поле тяжести при учете электрообъемной силы имеют вид

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \vec{d}\vec{v}/dt + \nabla p = \vec{\rho g} + q\vec{E}, \quad (2)$$

где при прочих обычных обозначениях q — объемная плотность электрического заряда. Система (1), (2) дополняется уравнениями:

Пуассона

$$\operatorname{div} \vec{E} = 4\pi q, \quad (3)$$

сохранения электрического заряда

$$\partial q/\partial t + \operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (4)$$

условием потенциальности электрического поля

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0, \quad (5)$$

откуда следует

$$\vec{E} = -\nabla \varphi,$$

и уравнением закона Ома

$$\vec{j} = q(\vec{v} + \mu \vec{E}), \quad (6)$$

где μ — подвижность. Используется система Гаусса при диэлектриче-