

14. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник. Т. II. М., Изд-во АН СССР, 1962.
15. H. M. Cassel and I. Liebman. Combustion and Flame, 1962, 6, 3.
16. A. Davis. Combustion and Flame, 1963, 7, 4.

УДК 662.216.5

ПРОБЛЕМЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГОРЕНИЯ

С. А. Янговский

(Москва)

Исследования в области горения углеводородов привели к открытию новых явлений, которые наряду с полуостровом цепного воспламенения при высоких температурах являются предметом глубокого изучения многочисленных исследователей во всем мире.

Открытие отрицательного температурного коэффициента скорости реакции окисления [1], первое описание двух температурных зон горения при атмосферном давлении [2], открытие двухстадийного воспламенения [3] и фундаментальные исследования самовоспламенения в статических условиях [4—6] явились основополагающими работами, которые, скрепленные теорией вырожденно-разветвленного цепного воспламенения [7], завершили начальный этап исследования низкотемпературного горения. Под этим подразумевается самовоспламенение и распространение пламени в зоне низких температур, в которой кроме холодного пламени наблюдается отрицательная зависимость предельного давления воспламенения от температуры, не подчиняющаяся выводам тепловой теории [8], и стадийное воспламенение. Скорость реакции горения сначала нарастает, проходит через максимум, затем замедляется и снова ускоряется. Литература, посвященная этому виду горения, приведена в [9, 10].

Накопленный огромный материал о низкотемпературном горении непрерывно дополняется новыми деталями, раскрывающими особенности этого далеко не познанного вида горения.

Интерес к изучению этого специфического процесса горения отчасти объясняется тем, что с ним связано решение ряда фундаментальных технических проблем, таких, как детонация в двигателях внутреннего сгорания, разработка новых технологических процессов органического синтеза на базе окисления углеводородов, и в особенности с проблемой безопасности и защиты нефтехимических предприятий и летательных аппаратов от произвольных взрывов и пожаров [11].

Многочисленные исследования низкотемпературного горения привели к заключению, что его особенности являются следствием химической кинетики предпламенных процессов. Знание этих закономерностей должно привести к искомой цели научных изысканий в области горения — к рациональным приемам химического управления процессами горения и взрывов.

Область холодного и двухстадийного воспламенения. За последние годы круг веществ, у которых наблюдаются холодное пламя и двухстадийное воспламенение, расширился. Своеобразное свойство холодного пламени, в котором реакция горения сопровождается невысоким тепловым разогревом, наблюдается у различных соединений. Так, в работах [12, 13] приводятся данные о холодном пламени ацетилена в смеси с

кислородом. Холодное пламя фтора с галогенсодержащими соединениями изучалось в работе [14]. Подробно исследовалось холодное пламя углеводородов в смеси с двуокисью азота [15]. Двухстадийное воспламенение наблюдалось для смеси изобутилена с воздухом [16]. На основании имеющихся данных можно утверждать, что многие горючие вещества подвержены холоднотемпературному горению, но наблюдать его можно только при строго определенных для данного вещества условиях.

Для углеводородов низкотемпературное горение может быть зарегистрировано в сравнительно широком диапазоне температур и давлений. Ранее [17] найденный факт существования холодного пламени не только при низких, но и при высоких давлениях и температурах нашел подтверждение в [18]. На рис. 1 показаны зона одностадийных и многостадийных холодных пламен и границы двухстадийного воспламенения. Впервые обнаружена зона одностадийного горючего воспламенения вблизи низких температур при высоких давлениях. Эти данные подтверждали различный характер самовоспламенения углеводородо-воздушных смесей.

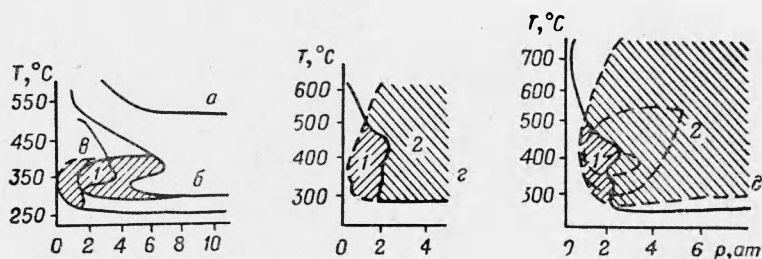


Рис. 1. Области самовоспламенения углеводородо-воздушных смесей. *a* — метано-воздушная смесь [5]; *б* — изооктано-воздушная смесь [5]; *в* — октано-воздушная смесь [5]; *г* — смесь 50% изооктана+50% гептана с воздухом [17]; *д* — смесь 60% изооктана+40% гептана с воздухом [18]. 1 — зона холодных пламен; 2 — зона двухстадийного воспламенения.

Низкотемпературное горение также наблюдается и при распространении пламени от нагретого источника или искры. В координатах концентрация — давление или концентрация — температура могут быть представлены воспламенение и распространение низкотемпературных пламен в смесях, близких к предельно бедным или предельно богатым. Такой вид горения вблизи концентрационных пределов отмечается у разнообразных горючих веществ [19], в том числе и для водородо-кислородных смесей [20]. Можно предполагать, что в механизме низкотемпературного горения следует искать причину расширения концентрационных пределов воспламенения под влиянием давления или температуры [6, 21, 22] (рис. 2). В этом же, по-видимому, и причина отклонения от правила аддитивности Ле-Шателье для концентрационных пределов воспламенения более широких, чем пределы распространения пламени, имеет большое практическое значение, так как этим параметром регламентируется защита промышленных объектов от взрывов и пожаров.

Кинетические законы воспламенения. Как отмечалось выше, уже из формы кривой зависимости предельного давления от температуры следовало предположение, что несмотря на то, что низкотемпературное горение наблюдается в широкой области температур и давлений, механизм воспламенения в отдельных зонах различный [23]. Такое пред-

положение нашло подтверждение в работе [24], а также при изучении зависимости периодов индукции от температуры. Из этих зависимостей следует, что кажущаяся энергия активации, вычисленная по периодам индукции первой (τ_1) и второй (τ_2) стадий, имеет различное значение в отдельных температурных зонах. Характер температурной зависимости периодов индукций приведен на рис. 3. О наличии различных температурных зон воспламенения свидетельствуют также данные о зависимости эффективного порядка реакции [23, 25] и относительного прироста давления в первой стадии сгорания [26, 27] от температуры

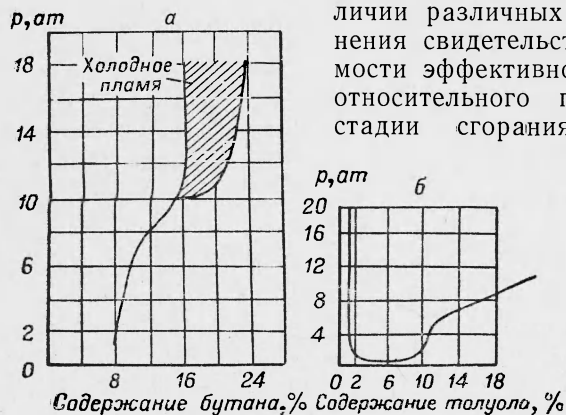


Рис. 2. Концентрационная область воспламенения бутано-воздушных (а) [6] и толуоло-воздушных (б) [21] смесей.

(рис. 4). Как видно из этих данных, максимумы интенсивности давления вблизи температур 300 и 400°С совпадают с максимумами концентраций окиси углерода при окислении гептана [28], отражая тем самым качественное различие первой стадии воспламенения в различных температурных зонах. Эти данные макрокинетики убедительно доказывают, что в низкотемпературной области механизм возникновения холодного двухстадийного воспламенения отличается в разных температурных зонах вследствие другой кинетики в предпламенной стадии сгорания [29, 30].

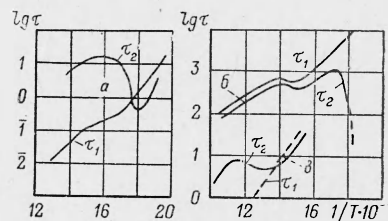


Рис. 3. Зависимость от обратной температуры логарифма периода индукции первой (τ_1) и второй (τ_2) стадии воспламенения в изотермической бомбе (а, б) и бомбе адиабатического сжатия (в). а — гептано-воздушная смесь [17]; б — смесь 60% изооктана + 40% гептана с воздухом [18]; в — смесь 60% изооктана + 40% гептана с воздухом [39].

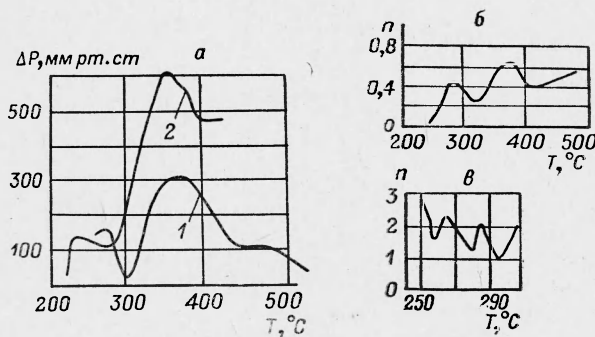


Рис. 4. Различные кинетические зоны воспламенения: а — зависимость интенсивности холодного пламени смесей гептана (кривая 1, $p=3$ атм) и изооктана (кривая 2, $p=4$ атм) с воздухом от температуры [27]; б — зависимость эффективного порядка реакции п-гептановоздушной смеси от температуры [23]; в — зависимость эффективного порядка реакции h смеси 2-метилпентана с кислородом от температуры [25].

Качественное различие в характере первой стадии воспламенения можно проследить по изменению интенсивности давления этой стадии $\Delta p_{хп}$ от начального давления (рис. 5). При низких давлениях интенсивность низкотемпературного воспламенения составляет 1,04—1,1, что соответствует разогреву 20—100°С. Такие изотермические пламена исследовались в работе [31].

Из данных, приведенных на рис. 5, следует, что с повышением давления интенсивность первой стадии растет и достигает 30% от интен-

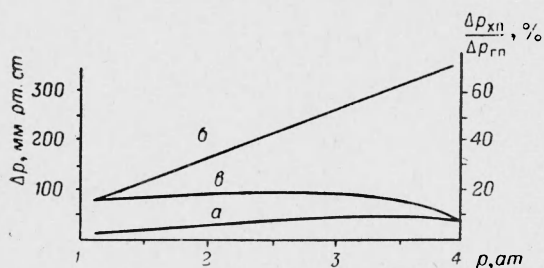


Рис. 5. Зависимость интенсивности холодного и горячего пламени от давления [23].

a — интенсивность холодного пламени $\Delta p_{хп}$; *б* — интенсивность горячего пламени $\Delta p_{гп}$; *в* — отношение интенсивности холодного пламени к горячему.

сивности горячего пламени. Это означает, что холодные пламена при некоторых условиях превращаются в термодиффузионные или в цепочно-тепловые. О подобных пламенах сообщалось в работах [32—34]. Характер низкотемпературных пламен изменяется также с изменением размеров сосуда [35].

Исследованию особенностей развития предпламенных процессов и

воспламенению при высоких давлениях неопределенных циклических и нормальных углеводородов в машинах адиабатического сжатия посвящены несколько работ. В работах [36, 37] измерялись периоды индукции холодного и горячего пламени и интенсивность этих стадий сгорания. В [38, 39] исследовались особенности первой и второй стадий (измерялись периоды индукции и интенсивность свечения первой стадии при различных температурах). Там подтверждается идентичность многостадийных процессов воспламенения в изотермической бомбе и при адиабатическом сжатии (см. рис. 3). Этот же вывод следует и из работы [25].

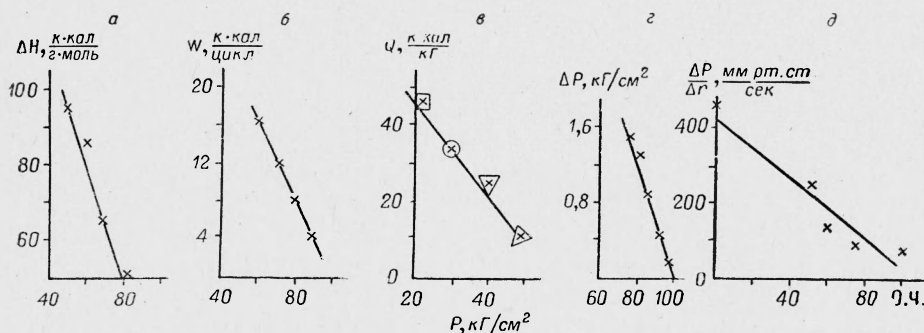


Рис. 6. Параметры холоднотемпературной стадии сгорания топлив с различным октановым числом (о. ч.) в двигателях (*a*—*г*) [83—86] и изотермической бомбе (*д*) [27].

в — по оси абсцисс давление при взрыве различных топлив в верхней мертвой точке.

На рис. 6 сопоставлены данные различных исследований двухстадийного самовоспламенения в двигателях с данными, полученными в изотермической бомбе. Как видно из рисунка, независимо от метода исследования в процессе сгорания различных топлив наблюдается одна

и та же закономерность: с повышением содержания изооктана в смеси с гептаном, т. е. с повышением октанового числа топлива, интенсивность тепловыделения первой стадии сгорания снижается [27]. В этих опытах подтверждено наличие одного и того же стадийного процесса сгорания, как в бомбе, так и в машине адиабатического сжатия и в реальных двигателях внутреннего сгорания. Этот же результат, который следовал из данных макрокинетики, был подтвержден химическим анализом промежуточных продуктов предпламенного горения [25] (рис. 7).



Рис. 7. Газохроматографическое разделение продуктов холодного окисления смеси 2-метилпентана с кислородом [25].
 А — продукты из двигателя; В — продукты из машины адиабатического сжатия; С — продукты из сферического стеклянного реактора.

Механизм низкотемпературного горения. Имеющиеся данные позволяют предполагать, что холодное пламя представляет собой цепное горение, протекающее по механизму вырожденного разветвления и сопровождаемое тепловыделением. Наличие отдельных кинетических зон предполагает также, что в каждой зоне присутствуют различные разветвляющие агенты. Разнообразными методами (химическими, хроматографическими, спектральными и т. п.) обнаруживаются промежуточные продукты холодного окисления в отдельных температурных зонах; это позволяет построить схему последовательных элементарных актов кинетики окисления. За последние годы перекисная схема окисления [40] получила значительно больше экспериментальных доказательств, чем альдегидная.

В [29, 41] поточным методом исследовалось окисление стехиометрической смеси *n*-гептана при температурах 290—400°С. Анализ промежуточных продуктов на содержание перекиси проводился полярографическим методом. Свободная перекись водорода, составляющая 25% от всех перекисей при 340°С, увеличилась до 43% при 400°С. При парафазном окислении циклогексана ниже 400°С наблюдаются три отдельные температурные зоны, в которых концентрация перекисей имеет максимумы.

Картлидж и Типпер [42, 43] провели анализ продуктов окисления хроматографическим и обычным методами. При температуре 350°С до 20% углеводородов переходят в диалкилгидроперекиси в *n*-гептане и моноалкилгидроперекись в *n*-бутане и циклогексане. Для этих же углеводородов при более высоких температурах (а для пропана и триптана при всех изученных температурах) разветвление идет через продукты окисления альдегидов — надуксусную и надпропионовую кислоты.

Боннер и Типпер [44] исследовали окисление смесей *n*-гептана и пропана с кислородом в статистических условиях по изменению температуры, давления, а также анализом продуктов реакции в течение периода индукции холодного пламени. Основные продукты при горении *n*-гептана — дигидроперекись — гептил и альдегидные соединения; при высоких температурах и после холодного пламени основной продукт — перекись водорода. Эти же авторы [45], изучая холодное пламя циклогексана, нашли, что концентрация гидроперекиси $C_6H_{11}OOH$ и $C_7H_{14}(OOH)_2$ при окислении циклогексана и *n*-гептана возрастает к кон-

цу периода индукции и почти полностью исчезает после прохождения холодного пламени. Добавление гидроперекиси заметно сокращает период индукции холодного пламени. Менее эффективна добавка ацетальдегида.

О роли гидроперекиси при холоднопламенном окислении *n*-гептана свидетельствуют данные Бургиса и Лауфлина [46]. Химическим анализом и чувствительными индикаторами гидроперекись была обнаружена в холодном пламени. Добавка гидроперекиси сокращала период индукции холодного пламени. Этот эффект, впервые показанный Блаттом Гербер и Нейманом [47], был подтвержден и опытами Бозе [48].

За последнее время перекисная схема окисления на основании данных анализа дополняется новыми деталями. Исследование хроматографическим методом промежуточных продуктов, накапливающихся за период индукции окисления изобутана и неопентана, позволило установить [49—51], что накопление различных промежуточных продуктов окисления отвечает закону цепного вырожденного разветвления. Промежуточные продукты образуются в результате мономолекулярного распада алкилперекисного радикала. В схеме окисления предусматривается, что наряду с образованием гидроперекиси, которая затем распадается на два радикала, протекает и реакция с образованием побочных продуктов. Схема окисления включает три основных этапа: а) окисление алкилрадикала до перекисного радикала, б) мономолекулярный распад этого радикала с образованием конечного продукта *o*-гетероциклического соединения и оксирадикала, в) взаимодействие оксирадикала с углеводородами с образованием гидроксильного продукта и алкилрадикала.

o-гетероциклические соединения были также обнаружены в течение периода индукции окисления углеводородов и другими авторами [52, 53]. Последние считают, что эти продукты образуются в холодном пламени при изменении структуры молекулы вследствие изомеризации алкилперекисных радикалов с образованием гидроперекисных радикалов, как это следует из [7]. Среди промежуточных продуктов окисления холодного пламени гексана и пентана Тримм и Сайад [54] нашли также *o*-гетероциклические соединения — 2,5-диметилтетрагидрофуран (в гексане) и 2,4-диметилнокситен (в пентане). Максимум этих продуктов (порядка $2-6 \cdot 10^{-5}$ моль) приходится на холодное пламя.

Анализируя продукты, образующиеся при холоднопламенном окислении 2-метилпентана хроматографическим и химическим методами, Фиш и др. [55, 56] обнаружили более 40 молекулярных соединений, включая *o*-гетероциклические соединения, перекиси, непредельные углеводороды, насыщенные и ненасыщенные альдегиды и кетоны. Их образование истолковывается качественно по теории алкилперекисной изомеризации радикалов. При низких температурах в холодном пламени алкилперекисный радикал является разветвляющим агентом. При более высоких температурах в холодном пламени ведет цепь гидроперекисный радикал. Фиш пришел к заключению, что изомеризация алкилперекисных радикалов — главная ступень цепного газофазного окисления в холодном пламени [58, 59].

Анализ промежуточных продуктов предпламенной реакции при более высоких давлениях в зоне двухстадийного сгорания в двигателях внутреннего сгорания [60, 61] или в машинах адиабатического сжатия [57] содержит карбонильные соединения, органические перекиси, ненасыщенные углеводороды, а также ацетилен и др., что говорит о сложном характере предпламенной реакции, затрудняющей возможность в настоящее время построения схемы реакции горения второй стадии.

Из приведенного материала следует, что установлены только основные этапы механизма холоднопламенного окисления. Дальнейшая расшифровка механизма низкотемпературного горения все еще требует интенсивных усилий.

Распространение холодного и горячего пламени и возникновение сферической детонации. Новые доказательства зависимости механизма возникновения сферической детонации («стука») в двигателе и в бомбе от низкотемпературного горения имеются в работе [62]. Там показано, что предпламенное горение приводит к возникновению волн сжатия, которые могут быть источником детонации в двигателе. Слабое двухстадийное пламя не образует волн сжатия, а пламя средней интенсивности дает волну сжатия, но не образует детонацию. Сильное двухстадийное пламя приводит к детонации. Орр [63] изучал в ударной трубе методом инфракрасной спектроскопии продукты реакции изооктана, гептана, бензола и др. Он показал, что в ударной волне есть низкотемпературная зона сгорания перед ударной волной и высокотемпературная зона сгорания в ударной волне. Гептан и изооктан дают более интенсивную предпламенную реакцию по сравнению с бензолом. Основные продукты сгорания: этилен, высшие олефины, ацетилен. Скорость сгорания в гептане больше, чем в изооктане. Эти результаты совпадают с известными ранее данными.

Большой интерес представляют данные по скоростям распространения двухстадийного пламени, в котором вторичное пламя способно ускоряться, распространяясь по среде предварительно сенсibilизированной продуктами сгорания первого пламени Эгню и др. [64—66], исследовали двухстадийное пламя в плоской горелке. Распространение многостадийного пламени наблюдали Сусуаси и Хикитта [67] в конической трубке в гексано-кислородных смесях. Энергия активации первой стадии сгорания равнялась 6 ккал/моль. В наших опытах в бомбе было найдено, что при повышенных давлениях скорость распространения пламени в первой стадии составляла 30—40 см/сек, а скорость распространения второго пламени достигала 200 см/сек. При этом возникали перепад давления, вибрации и стук.

Приведенные данные могут служить подтверждением предположения, что источником произвольных детонационных взрывов в закрытых реакторах, которые нередко происходят в промышленности [68], является многостадийный процесс самовоспламенения, как результат низкотемпературного механизма окисления. Дальнейшее исследование распространения низкотемпературного горения имеет значение для выяснения проблемы возникновения ударных волн и детонации.

Влияние ингибиторов на кинетические параметры низкотемпературного самовоспламенения. Химическая природа возникновения ударных волн и детонации открывает возможность воздействия химическими средствами на различающийся во времени макростадийный процесс воспламенения. Из данных [17] следует, что тетраэтилсвинец (ТЭС) сдвигает предельное давление горячего взрыва в сторону высоких давлений. Этот же факт получен и для анилина (рис. 8). Уэдингтон [69] показал, что алифатические амины сдвигают полуостров низкотемпературного самовоспламенения в сторону высоких давлений. По опытам [17] ТЭС удлиняет период индукции горячего пламени и слабо влияет на период индукции первой стадии. Аналогичный эффект отмечают и другие авторы [70—72].

В работе [73] показано влияние ТЭС на две стадии воспламенения в двигателе. На первую стадию, ведущую к образованию холодного пламени, ингибитор оказывает меньшее влияние, чем на последующую,

ведущую к образованию горячего пламени. Отсюда следует, что холодное пламя разлагает ТЭС до его активной формы.

Из наших данных [17, 74] следует, что ингибитор снижает интенсивность первой стадии воспламенения в бомбе. По результатам, полученным в двигателе [61], количество промежуточных продуктов в предпламенной стадии воспламенения при добавке ТЭС снижается для изо-

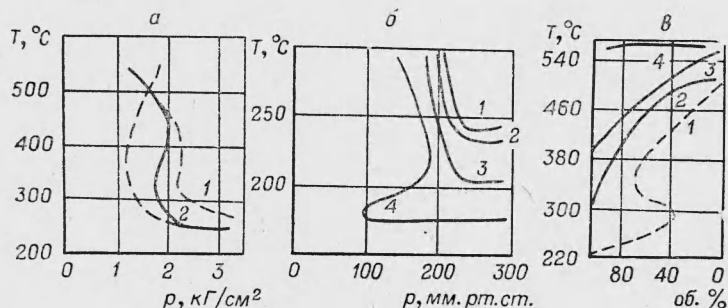


Рис. 8. Влияние ингибиторов на пределы нижнетемпературной области воспламенения, найденное методами «впуска» (а, б) и «капли» (в).

а — влияние аналина (1) на пределы второй стадии воспламенения (2) смеси 25% гептана + 75% изооктана с воздухом [17]; б — влияние этиламина (1), диметиламина (2) и пиперидина (3) на пределы воспламенения диэтилового эфира (4) [69]; в — влияние диэтиламина (2), дилаурилселенида (3) и тетраэтилсвинца (4) на пределы воспламенения смеси додекана с 1,1-динеопентилтаном в воздухе (1) [82].

октана и гептана. Особенно резко сокращается количество перекиси водорода и формальдегида. Продукты предпламенной реакции чистого изооктана и с примесью ТЭС, образующиеся в двигателе, были изучены в работе [75]. Там было показано, что интенсивность холодного пламени при всех температурах уменьшается от прибавки ТЭС. Анализ промежуточных продуктов показал, что концентрация перекисей при добавке ТЭС значительно снижается по сравнению с чистой смесью.

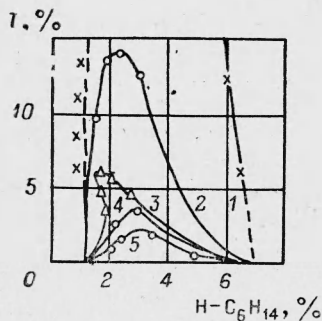


Рис. 9. Влияние различных ингибиторов (1) на концентрационную область распространения пламени смеси *n*-гексана с воздухом [79].

1 — N_2 ; 2 — C_2F_5Cl ; 3 — CH_2Br ;
4 — CF_3I ; 5 — Br_2 .

Значительное количество работ за последние годы посвящено влиянию ингибиторов на концентрационные пределы и скорость распространения пламени [76—78]. Под влиянием ингибиторов бедный и богатый пределы сближаются, и область воспламенения замыкается (рис. 9). Вне этой области смесь взрывобезопасна. Под влиянием ингибиторов также снижается скорость распространения пламени. Более эффективными ингибиторами являются галоидоводороды, тетрафтордибромэтан ($C_2F_4Br_2$) и бромтрифторметан (CF_3Br), как эффективные пламягасители, по сравнению с нейтральными разбавителями (N_2 , CO_2) [79—81].

Изменение параметров низкотемпературного воспламенения под влиянием ингибиторов свидетельствует о том, что эффект ингибирования, по-видимому, заключается в воздействии на вырожденно-разветвленную цепную реакцию, характерную для низкотемпературного горения.

Поступила в редакцию
25/XII 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. R. N. Pease, W. R. Munro. *J. Am. Chem. Soc.*, 1929, **51**, 1839.
2. M. Prettre. *The Science of Petroleum*, 2950, Oxford, 1938.
3. Б. Айвазов, М. Б. Нейман. *ЖПХ*, 1936, **8**, 88.
4. D. T. A. Townend. *Proc. Roy. Soc.*, 1933, **A144**, 484.
5. D. T. A. Townend. *Chem. Rev.*, 1937, **21**, 259.
6. M. Hsieh, D. T. A. Townend. *J. Chem. Soc.*, 1939, 332.
7. Н. Н. Семенов. О некоторых проблемах кинетики и реакционной способности. М., Изд-во АН СССР, 1958.
8. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., «Наука», 1967.
9. А. С. Соколик. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М., Изд-во АН СССР, 1960.
10. В. Я. Штерн. Механизм окисления углеводородов. М., Изд-во АН СССР, 1960.
11. W. J. Lydiard. *J. Roy. Aeron. Soc.*, 1964, **64**, 11.
12. K. Kiyama, I. Osugi, S. Kusuhara. *Rev. Phys. Chem. (Japan)*, 1957, **27**, 22.
13. W. W. Robertson, F. A. Matsen. *Combustion and Flame*, 1957, **1**, 99.
14. Л. Русин. *ЖПС*, 1966, **4**, 117.
15. А. Б. Толпачев, Т. Ф. Федулова и др. *Нефтехимия*, 1962, **11**, 211.
16. I. Osugi, H. Kubobe. *Chemical Abstracts*, 1966, **64**, 19308.
17. А. С. Соколик, С. А. Янтовский. *ЖФХ*, 1946, **20**, 13.
18. А. А. Ганиходжаев. Канд. дисс. МАДИ, 1966.
19. С. Янтовский. *Безопасность труда*, 1967, **8**, 50.
20. С. А. Янтовский, М. В. Черняк. *ЖФХ*, 1966, **40**, 2899.
21. С. А. Янтовский, А. Ю. Сидорина, М. В. Черняк. *Нефтехимия*, 1966, **6**, 105.
22. R. Sato, W. Bilbert, J. Kunta. *Fire Technol.*, 1967, **3**, (1), 14.
23. С. А. Янтовский. *Кинетика и катализ*, 1964, **5**, 34, 399.
24. A. D. Wolsh. 9-th Symposium on Combustion, 1963, 1064.
25. W. S. Affleck, A. Fish. 11-th Symposium on Combustion, 1967, 1008.
26. K. G. Williams, I. E. Johnson, H. W. Carhart. 7-th Symposium on Combustion, 1959, 392.
27. С. А. Янтовский. *Кинетика и катализ*, 1967, **8**, 506.
28. K. C. Soloaja. *Combustion and Flame*, 1969, **4**, 119.
29. D. H. Allen, F. H. Garner. *Combustion and Flame*, 1959, **3**, 75.
30. J. A. Bernard, T. W. Honeyman. *Proc. Roy. Soc.* 1964, **A279**, 236, 248.
31. W. A. Affens, J. Johnson, H. Carhart. *J. Chem. Eng.* 1961, **6**, 613.
32. В. Kaesche-Krischer, H. G. Wagner. *Brennstoff Chemie*, 1958, **39**, 33.
33. R. Donovan, W. Agnew. *J. Chem. Phys.*, 1958, **23**, 1592.
34. G. H. Maguerian, I. E. Bassert. *J. of Chem. a. Engin. Data* 1962, **7**, 127.
35. J. M. Kuchta, G. H. Martindill. *Combustion and Flame*, 1967, **11**, (3), 212.
36. A. Martinengo, H. Wagner. *Zeit. Phys. Chem. Neue Folge*, 1959, **20**, 206.
37. A. Martinengo, H. Wagner. *Zeit. Phys. Chem. Neue Folge*, 1959, **22**, 292.
38. А. Воинов, Д. Скороделов. *Кинетика и катализ*, 1967, **8**, 252.
39. А. Воинов, Д. Скороделов, Ф. Соколов. *Кинетика и катализ*, 1964, **5**, 388.
40. M. Seakins, G. Henschelwood. *Proc. Roy. Soc.*, 1963, **A276**, 324.
41. R. Long, J. TODD. *Proc. Chem. Soc.*, 1959, 328.
42. J. Cartlidge, C. E. Tipper. *Proc. Roy. Soc.*, 1961, **A261**, 388.
43. J. Cartlidge, C. E. Tipper. *Proc. Chem. Soc.*, 1959, 190.
44. M. Bonner, C. E. Tipper. *Combustion and Flame*, 1965, **9**, (4), 387.
45. M. Bonner, C. E. Tipper. *Combustion and Flame*, 1965, **9**, 317.
46. A. P. Burgess, G. W. Laughlin. *Chem. Commun.*, 1967, **15**, 769.
47. Э. И. Блатт, М. И. Гербер, М. Б. Нейман. *ЖОХ*, 1939, **9**, 732.
48. A. N. Bose. *Trans. Farad. Soc.*, 1959, **55**, 778.
49. A. P. Zeelenberg, H. W. de Brujn. *Combustion and Flame*, 1965, **9**, 281.
50. A. P. Zeelenberg. *Recueil Trav. chim.* 1962, **81**, 720.
51. A. P. Zeelenberg. *J. Chem. Soc.*, 1961, 4014.
52. E. Schröder, G. Ohlmann, E. Leibnitz. *Z. Phys. Chem.*, 1964, **225**, 175.
53. C. F. Cullis, A. Fish, J. E. Gibson. *Proc. Roy. Soc.*, 1965, **284**, 108.
54. D. L. Trimm, M. Saed. *Combustion and Flame*, 1966, **10**, (3), 311.
55. A. Fish. *Proc. Roy. Soc.*, 1966, **A293**, 378.
56. A. Fish. *Proc. Roy. Soc.*, 1967, **A298**, 204.
57. A. Martinengo, J. Molozzer, E. Schlimme. 10-th Symposium on Combustion, 1965, 323.
58. C. F. Cullis, A. Fish a. o. *Proc. Roy. Soc.*, 1966, **A289**, 402.
59. C. F. Cullis, A. Fish, D. Trimm. *Proc. Roy. Soc.*, 1963, **A273**, 427.
60. E. N. Malmberg, M. L. Smith. 5-th Symposium on Combustion, 1955, 385.
61. A. I. Pahnke, P. M. Cohen, B. M. Stargis. *Ing. Eng. Chem.*, 1954, **46**, 1024.

62. I. C. Firey, R. R. Lavi. *Combustion and Flame*, 1961, 5, 27.
63. C. R. Orr. 9-th Symposium on Combustion, 1963, 1034.
64. W. G. Agnew, I. T. Agnew a. o. *Combustion and Flame*, 1960, 4, 29.
65. W. G. Agnew. *Combustion and Flame*, 1962, 6, 361.
66. W. G. Agnew, I. T. Agnew. 10-th Symposium on Combustion, 1965.
67. S. Susuyasu, T. Hikiita. *Combustion and Flame*, 1965, 9, (1), 1.
68. С. Янговский. *Журн. ВХО им. Менделеева*, 1964, 9, 305.
69. D. J. Wadington. 7-th Symposium on Combustion, 1959, 165.
70. I. Lavengood, W. Leary. *Ind. Eng. Chem.*, 1951, 43, 2797.
71. E. Rifkin, C. Walcutt. *Ind. Eng. Chem.*, 1956, 48, 1532.
72. E. Rifkin, C. Walcutt. *SAE Quart. Trans.* 1957, 65, 552.
73. D. Downs, S. Griffins, R. Wheeler. *J. Inst. Petrol.* 1961, 47, 1.
74. С. А. Янговский. *ЖПХ*, 1967, 40, 1856.
75. J. B. Meghard, C. E. Lecobe, L. B. Craiff. *Combustion and Flame*, 1967, 11, (2), 155.
76. F. H. Garner, R. Long a. o. 6-th Symposium on Combustion, 1957, 802.
77. F. E. Bells, O. O'Neil. 6-th Symposium on Combustion, 1957, 806.
78. E. C. Creitz. *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 1961, A65, 389.
79. G. Lask, H. Wagner. 8-th Symposium on Combustion, 1962, 432.
80. C. Halpern. *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 1966, A70, 133.
81. W. A. Rosser, H. Wise, J. Miller. 7-th Symposium on Combustion, 1959, 175.
82. C. E. Frank, A. U. Blacham, D. E. Swarts. *Ind. Eng. Chem.*, 1953, 45, 1751.
83. D. U. Pastell. *SAE Quart. Trans.* 1950, 4, 571.
84. E. Rifkin, C. Walcutt, G. Betker. *SAE Quart. Trans.*, 1952, 6, 472.
85. W. Levedahl, F. Howard. *Ind. Engn. Chem.*, 1951, 43, 2805.
86. W. Corzellius, I. Caplan. *SAE Quart. Trans.*, 1952, 6, 489.

УДК 536.46

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПЛАМЕНИ НА СТРУЯХ И НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ В ПОТОКЕ

*В. А. Костерин, Л. А. Дудин, И. П. Мотылинский,
Е. В. Ржевский, Б. А. Рогожин, А. Я. Хисматуллин*

(Казань)

В настоящее время для стабилизации пламени в камерах сгорания, где скорости потока существенно больше скоростей горения смеси, широко используются зоны циркуляции, в которых перенос тепла и активных центров к свежей горючей смеси осуществляется обратными течениями.

В ряде случаев организация циркуляционного течения в потоке с помощью струй горючего, окислителя, инертного газа или их смеси имеет преимущества по сравнению со способом получения отрывного циркуляционного течения и стабилизации пламени на плохообтекаемых телах. При струйной стабилизации пламени можно плавно изменять размеры циркуляционной зоны, регулировать состав и температуру газа в ней независимо от основного потока, комплексно решать вопросы смесеобразования и стабилизации пламени, создавать зоны повышенной турбулентности в потоке, эффективно охлаждать систему смесеобразования и стабилизации пламени. В форсажных камерах струйные (газодинамические) стабилизаторы пламени позволяют снизить гидравлическое сопротивление при выключенной камере.

В данной статье изложены некоторые результаты комплексного исследования на моделях газодинамики взаимодействия струй с потоком на холодных режимах и при горении, механизма и пределов стаби-