

ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ ПРОМОТИРОВАНИЯ И ИНГИБИРОВАНИЯ ГОРЕНИЯ

В.К. Манжос^{1*}, Б.Я. Колесников²

¹Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского, Новосибирск, Россия

²Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра 172, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

За последние десятилетия опубликовано большое количество работ по ингибированию и промотированию горения. Сюда входят как химические добавки, так и использование физических воздействий. Углубленное исследование в каждом случае подразумевает выяснение наиболее важных факторов влияния и выбор максимально эффективного способа управления процессом. В ряде работ указывается на неоднозначность результата в зависимости от количества добавок либо изменения условий. Но причины подобных изменений не всегда понятны. В любом случае следует исходить из взаимосвязи процессов ингибирования и промотирования в волне горения, совместного влияния химических и физических действий для подбора эффективных способов горения, торможения процесса либо получения новых веществ на промежуточных стадиях неполного сгорания.

Ключевые слова: процесс горения, промоторы, ингибиторы, физические способы воздействия, концепция процесса промотирования и ингибирования.

1. Введение

Пламя в газовой фазе характерно для горения большинства видов топлива. Тем не менее, как было отмечено в [1], сложно создать универсальную модель, пригодную для всех систем и существующих условий горения. Рассмотрим данный вопрос с учетом факторов, присущих любой горючей системе. Представление о волне горения как области, имеющей пренебрежимо малые размеры, удобно для математических моделей, но оно не учитывает возможность химических превращений. Зона перед фронтом пламени (до области свечения) обычно считается лишь зоной подогрева. Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в ней уже происходит превращение топлива в промежуточные и частично конечные продукты [2-5].

При вводе промоторов уменьшается время и энергия воспламенения, увеличивается скорость горения, возможен рост температуры горения. При введении ингибиторов наблю-

дается торможение воспламенения, снижение скорости горения, снижение температуры пламени либо его гашение. Меняется структура перед пламенной зоны.

Особо следует отметить, что количество вводимых добавок не должно существенно менять характеристики исходной смеси. Иначе возникает близкая, но все-таки отличающаяся горючая система с наличием новых веществ. Обычно концентрация вводимых добавок составляет доли либо максимально несколько процентов от общей смеси. Но правильнее делать сравнение содержания добавок не ко всей смеси, а к концентрации компонентов, ведущих горение.

Отмечается определенный оптимум концентрации добавки, оказывающей максимальное действие. Превышение найденного количества добавки либо ее снижение начинает оказывать уже меньший эффект. Это означает, что данный канал влияния для имеющихся условий исчерпан. Дополнительный эффект может достигаться либо введением другой

*Ответственный автор

E-mail: galina-manzhos@mail.ru (В.К. Манжос)

добавки для изменения протекания реакций в другой области фронта пламени, либо данная система с имеющимися компонентами уже не способна менять параметры горения для установленных условий. Аналогичное поведение отмечено и для физических способов. В определенных пределах их влияние наиболее эффективно, а вне пределов ослабляется, либо даже меняется на противоположное. Подобное поведение явно указывает на изменения механизма реакций.

Известные способы промотирования горения рассматривались в [6, 7]. К ним относятся физические: температура, давление, гравитация, термовакуумная обработка, механоактивация, акустическое воздействие, магнитное и электрическое поля, свет, плазменная обработка. Химические способы включают ввод изомеров, добавки более активных топлив (водород, углеводороды, твердые добавки, активные металлы), ввод активных окислителей, ряда промежуточных для рассматриваемой системы веществ (для углеводородных пламен – это альдегиды, пероксиды, спирты, свободные радикалы), добавление продуктов неполного сгорания (форкамерный эффект), инициаторов цепей (элементоорганические соединения, катализаторы, галогены и их производные, продетонаторы). Наибольший эффект промотирования заметен при воспламенении. Влияние на скорость горения, температуру пламени оказывается слабее.

Рассмотрим подробнее факторы, способствующие промотированию. Повышение температуры горючей газовой смеси, рост давления способствует увеличению числа столкновений реагирующих частиц. В результате роста энергии частиц «эффективная величина» энергетического барьера для начала реакций оказывается меньше. Для жидких и твердых систем эффект будет заметен на скорости перехода конденсированной фазы в газообразное состояние, в изменении реакционной способности поверхности. Более сложные процессы отмечаются при горении в пористых средах, когда нагретые продукты проходят через слой негорючего материала (фильтрационное горение [8]), либо через горючие пористые среды (горение торфяников, внутрипластовое горение [9], газификация углей [10]). В таких сложных системах важен анализ химической структуры пламен для выбора необходимого действия [11, 12].

Влияние акустических и ультразвуковых колебаний было обнаружено в пламенах газо-

вых смесей [13]. Считается, что здесь происходит мелкомасштабная турбулизация и искривление фронта пламени. Подобный эффект заметен и в твердых системах. Горение титана с бором при ультразвуковом воздействии шло интенсивнее, и отмечено повышение ионизации [14]. Но колебательные воздействия в определенном диапазоне частот могут влиять на прочность связей в молекулах, условия фазового перехода в жидкостях и твердых веществах.

Пламя в газовой фазе при хемоионизации содержит движущиеся заряженные частицы, обладает собственным электрическим и магнитным полями. Потому действие внешних электромагнитных полей должно отражаться на протекании процессов [5, 15]. Более важным здесь оказывается то, что результат зависит не только от напряженности, вида и направления поля, но и от локального места его приложения.

Еще одно обстоятельство было обнаружено при наложении электрического поля – неоднозначность оказываемого эффекта. В ряде случаев можно осуществлять промотирование, и на тех же системах – ингибирование горения. Воздействие поля на раздел газовой и жидкой фаз приводит к аномальному, на порядок, увеличению скорости горения. При предварительной обработке электростатическим полем жидкой фазы наблюдается уменьшение интенсивности горения. При исследовании влияния электрического поля на скорость выгорания жидких углеводородов от декана до тетрадекана, керосина установлено, что в диапазоне напряженностей 0-60 кВ/м скорость горения возрастает в 8 раз. Но при локальном наложении электростатического поля на зону фазового перехода испарение заменяется процессом взрывного кипения [16]. Воздействие поля на газовую фазу меняет форму факела пламени и протекание в нем реакций хемоионизации, что приводит к изменению процесса горения. Электрическое поле меняет характер испарения жидкости при размещении одного электрода в жидкой среде, а второго в газовой (тоже возникает взрывной режим). Подобный эффект отмечен для расплавленной части при горении каучуков [17], полимеров [18].

Для горения твердых веществ важны способы предварительной механоактивации компонентов. В результате происходит не только рост площади соприкосновения взаимодействующих частиц за счет измельчения, но и активация поверхности (образование локаль-

ных поверхностных дефектов либо дислокаций, которые реагируют иным образом) [19]. При исследовании влияния механохимической активации и микропомола на интенсивность горения частиц твердого топлива было обнаружено уменьшение времени выгорания частиц. Опыты по факельному сжиганию пылеугольного топлива подтвердили эффект механоактивации [20]. Такие участки поверхности оказываются более активными.

Активация будет заметна не только в смесях твердых компонентов, но и в реакциях твердых веществ с газами либо жидкостями, которые адсорбируются и взаимодействуют на их поверхности. Как и в катализаторах, в подобных системах возможны добавки, дезактивирующие подобные реакционноспособные места поверхности (ингибиторы, каталитические яды), либо способствующие дополнительной селективности и активации (промоторы).

Применяемые на практике каталитические генераторы тепла и устройства дожигания выхлопных газов работают по близкому принципу. Но главным здесь, в любом случае, оказывается именно роль поверхности [21]. При сопоставлении каталитического метода сжигания твердого топлива в псевдоожиганном слое с некаталитическим было показано, что использование катализаторов приводит к снижению материалоемкости и габаритов тепловых установок примерно на порядок, а удельная нагрузка на объем реактора возрастает более чем в 20 раз. Резко снижается выброс токсичных веществ с продуктами сгорания топлива [22]. Активация поверхности при предварительной термовакуумной обработке твердых систем возникает за счет десорбции веществ с поверхности. Особенно это заметно для аморфных продуктов [23].

Использование металлов, способных гореть в воздухе, (главным образом, алюминия, магния и бора) при горении перхлоратов вызывает ускорение благодаря повышению теплопередачи в холодные части фронта [24].

Плазменные способы инициирования достаточно очевидны, поскольку плазма содержит атомы, радикалы, ионы, возбужденные частицы [25]. Понятно, что подобное действие, аналогичное традиционным искровым методам, должно ускорять начальные этапы, но способно значительно влиять и на последующие стадии процесса. Эффект определяется не только энергетическими параметрами, но и быстрым вводом в систему дополнительного количества активных частиц.

В [26] представлены многолетние результаты плазменной подготовки различных углеводородсодержащих топлив не только в целях переработки, но и для последующего сжигания. Об эффективности подобного воздействия можно судить по воспламенению сверхзвукового пропан-воздушного потока в условиях низкотемпературной плазмы поверхностным СВЧ-разрядом [27]. Разряд позволяет уменьшить период индукции от 1 мс до 5 мкс при росте энергии. Воспламеняются как богатые, так и бедные смеси. Скорость распространения передней границы области горения зависит от эквивалентного отношения смеси и подводимой СВЧ-мощности и максимальна в стехиометрической смеси, достигая 160 м/с. Температура горения в этих условиях составляет около 3000 К.

Промоторы обычно представляют собой соединения, у которых энергии разрыва связей невелики. Их введение в исходную смесь способствует более легкому иницированию цепей и их продолжению.

Поскольку добавки в пламени претерпевают превращения, то следует обязательно учитывать реакции образующихся из них продуктов с остальными частицами. Влияние химических добавок различается для бедных, стехиометрических и богатых смесей. Кроме того они могут ингибировать реакции в одной части пламени, но промотировать в другой [6, 7, 28].

Осуществление полноты дожигания в горячей зоне (особенно в случае богатых смесей) может обеспечить достижение большей производительности, дать заметную экономию топлива либо снижение выбросов экологически вредных продуктов. Такую роль обычно выполняют системы с катализаторами, предварительно введенными в горючую смесь, либо располагаемыми непосредственно в зоне догорания. Для большинства стандартных углеводородных топлив наблюдается превращение оксида углерода в диоксид, сжигание сажи при более низких температурах, а также снижение количеств вредных оксидов азота.

В качестве промоторов для углеводородных топлив широко используются органические нитраты, пероксиды, тионитраты и схожие по поведению вещества. Присадки на основе пероксидов являются более экологичными и безопасными, хотя по эффективности они уступают нитратам [29].

В России допущены в составе дизельных топлив цетаноповышающие присадки: изопропилнитрат [30], циклогексилнитрат [31],

присадки на основе 2-этилгексилнитрата. Принципиально ввод более тяжелых алкилнитратов (C_1-C_{25}) [32] уже не меняет существенно характеристик воспламенения. Данные соединения вводят в жидкие топлива в количестве $\sim 0,3\%$ (до $1,0\%$). В результате, например, цетановое число возрастает на 2-6 единиц. Но сильно повышать цетановое число оказывается нецелесообразно. Вводя в смесь промоторы воспламенения, мы влияем уже на рабочий цикл дизеля и состав отходящих газов, а влияние это неоднозначно.

Для топлив, в составе которых основу составляют спирты [33] (50-90 об.% абсолютного этилового спирта, 10-30 об.% жидкой смеси углеводородов, 5-15 об.% простого эфира), в качестве промотора сгорания могут использоваться циклогексилнитрат или 2-этилгексилнитрат и/или нитриты спиртов C_4-C_6 . При этом обеспечивается более полное сгорание топлива и сокращается время сгорания, что позволяет повысить мощность двигателя при работе на этом топливе.

Ингибирование представляет факторы противоположного действия. Это способы, которые позволяют заметно увеличить гибель активных частиц в холодных областях пламени, ослабить поток активных частиц, диффундирующих из горячей зоны, уменьшить зону прогрева исходных компонентов, снизить температуру горячей зоны.

Молекулы ингибитора или продукты его распада реагируют с атомарным водородом и кислородом, а также промежуточными радикалами или ионами, представляющими собой активные центры. Они превращают их в менее активные соединения либо даже устойчивые, затормаживают или прерывают развитие цепей. С атомарным водородом эффективно реагируют галогенпроизводные, чем объясняется универсальность галогенпроизводных как химических ингибиторов. В ряду производных насыщенных углеводородов как ингибиторов наиболее эффективными являются те, большая часть атомов водорода которых замещена атомами галогенов. Как исключение из этого правила можно рассматривать горение водорода. Здесь более эффективными ингибиторами оказываются не полностью галогенированные углеводороды [34]. Автор считает, что пока добавки ингибитора нейтрализуют лишь избыточное количество активных частиц, реакция горения продолжается, хотя и медленнее. И только при нейтрализации некоторого критического ко-

личества активных частиц пламя не способно гореть самостоятельно и гаснет.

Эффективность замедления реакций галогенсодержащими соединениями составляет ряд $F < Cl < Br < I$. [29]. В качестве эффективных ингибиторов горения в пожаротушении широко применяются хладоны (галоидуглеводороды), огнетушащие порошки и аэрозоли на основе щелочных металлов, фосфорсодержащие вещества. Их эффективность зависит от химической природы ингибитора и характера ингибируемой среды, места введения, температуры, содержания других веществ [29, 35]. Повышение огнетушащей способности хладоновых и фосфорсодержащих ингибиторов может быть достигнуто комбинацией их с охлаждающими и инертными веществами (вода, углекислый газ, азот, флегматизаторы). Горение металлов, некоторых гидридов, порохов и ряда других горючих веществ подобной способности ингибирования горения не проявляет, т.к. механизм и условия горения таких систем отличаются от горения обычных систем. В [29, 35] представлены характеристики нескольких тысяч веществ и материалов с указанием средств для их тушения. Хотя кажется, что все уже известно, тем не менее, поиск комбинированных ингибирующих составов может быть плодотворным.

Для снижения скорости горения твердых топлив в качестве ингибиторов применяют фтористые соединения (LiF , CaF_2 , BaF_2) и гетеромолибдаты. Так, добавка 2% LiF к полиуретановому топливу снижает скорость горения в 2 раза [36]. Для подобных целей пригодны некоторые полимерные органические соединения, содержащие бром или хлор [37]: сополимеры, содержащие стирольные и 2,3-дибромпропилмалеинимидные повторяющиеся звенья; бромированные сложные и простые полиэфиры. Разлагаясь в процессе горения, они образуют галогеноводороды, которые реагируют с гидроксильными радикалами, непрерывно регенерируя галогеноводороды. Небольшие добавки соединений сурьмы значительно повышают эффективность галогенов.

При горении полимеров часто остается обуглившаяся фаза, которая отдает большое количество тепла. Для подавления этого процесса используют негорючие неорганические соединения, в основном производные фосфорной кислоты, а также силикаты и бораты [38]. Иной тип огнезащитных добавок, повышающих кислородный индекс полимерных систем, представляют бромированные соединения с

низкой молекулярной массой ($< \sim 1500$ г/моль) [39]. В качестве огнезащитных добавок применимы различные фосфорные соединения: органические фосфаты, фосфонаты и фосфорамиды [40].

Антипирены – как средства поверхностной защиты твердых горючих материалов содержат в своем составе легкоплавкие соли борной, ортофосфорной и кремниевой кислот, кроме них применяют галогеносодержащие антипирены, фосфоросодержащие, сурьмянистые, азотсодержащие, металлосодержащие (Al, Mg, Ti, V, Mo, W, Zn, Sn, Fe ...), интумесцентные (вспучивающиеся) системы, полимерорганические коксообразователи, предкерамику, полимерные наноккомпозиты [41]. При горении значительная часть тепла расходуется на плавление поверхностного защитного вещества, в результате свежие области горючего материала имеют меньшую температуру, недостаточную для продолжения процесса. Антипирены, выделяющие при нагревании негорючие газы, изменяют состав окружающей среды, понижая концентрацию подводимого кислорода. Нередко эти средства работают комплексно в составе одного средства.

Механизм антипирирования соединениями фосфора сложен и зависит от природы защищаемого материала [42]. Лучший эффект достигается, когда фосфор входит в полимерную цепь, а не введен в виде низкомолекулярной добавки. Антипиряющее действие фосфора резко улучшается при комбинации последнего с хлором и особенно бромом или азотом (аминные формы), так как эти элементы дают при пиролизе газообразные ингибиторы горения, а фосфор является лучшим ингибитором горения твердой фазы (углистого остатка) – тления. Потому для обеспечения оптимальной огнестойкости требуется введение малых количеств антипирена.

Для некоторых газовых и жидких систем эффективно введение некоторого количества менее активного топлива. Горение водорода с воздухом затормаживается при вводе пропана [43], смеси пропана и пропилена [44], спиртов [45, 46]. В результате часть активных центров будет расходоваться в более медленных реакциях, что и обеспечивает суммарный ингибирующий эффект. Аналогично, замедление скорости горения смеси водорода с кислородом можно осуществлять посредством введения паров ацетона, воды и т.п. Для твердых смесевых топлив изменение скорости горения может быть достигнуто за счет полной либо

частичной замены перхлората аммония другими окислителями: снижение – нитратом аммония; увеличение скорости горения – заменой перхлората аммония перхлоратом калия или монометилперхлоратом аммония [36].

Рассмотрим процесс горения, начиная с подготовки компонентов и завершая отводом продуктов.

2. Подготовка компонентов и горючей смеси

Если подготавливаемая смесь способна при случайном иницировании поддерживать горение, то определяющее значение имеет безопасность. Подготовка осуществляется в соответствии с конструкцией устройства по количеству и качеству компонентов, способу ввода (непрерывный, порционный), с предварительным смешением либо без него и т.д.

Для газов основным фактором оказывается поддержание требуемой температуры, давления, расхода, состава. Для жидких топлив, которые имеют температуру кипения выше окружающей среды, достаточно поддержание заданной начальной температуры. Это будет определять скорость стабильного распыления либо перевода в пар. Твердые виды топлива в зависимости от режимов сгорания должны иметь однородный гранулометрический и химический состав. Для них оказываются важными некоторые внешние условия. Чаще всего это температура, влажность, наличие примесей.

2.1. Ингибирование

Для сохранения заданных свойств топлива, окислителя или приготовленных смесей в них добавляют вещества, способные предотвращать образование нежелательных продуктов. В частности, при длительном хранении в присутствии воздуха в компонентах газообразного и жидкого углеводородного топлива могут образоваться оксидные соединения, легко образующие радикалы. Антиоксиданты в бензинах и реактивных топливах ингибируют окисление углеводородов и отчасти полимеризацию непредельных соединений. В данном случае «ловушки для кислорода» и образующихся радикалов будут наиболее эффективным средством поддержания начальных свойств. Обычно это диаминовые соединения либо алкилфенолы [47]. Главное, чтобы количества добавок были невелики и не изменяли в заметных пределах свойства исходной смеси.

Другой способ поддержания стабильности – ввод флегматизаторов в исходные компоненты в количествах, не влияющих впоследствии на процесс в целом. Это может быть полезным для достаточно активных топлив типа водорода, ацетилена, метана и аналогичных, если данные флегматизаторы участвуют в процессе.

В случае твердых горючих систем – характерный пример спички – чувствительный к присутствию кислорода белый фосфор в головках был заменен на красный (менее активный). Ввод других веществ (сера, животные и растительные клеи, сульфид фосфора P_4S_3), наполнители (измельченное стекло, Fe_2O_3), предотвращает взрывной характер горения головки. Все это значительно снизило опасность самопроизвольного возгорания [48]. Но зажигание требовало уже трения с усилием.

В химическом производстве очень опасным фактором оказывается электризация. Она возникает в процессах, сопровождающихся трением, при дроблении, измельчении, обработке давлением и резании, разбрызгивании (распылении), просеивании и фильтрации материалов-диэлектриков и полупроводников, перекачке, транспортировке, сливе жидкостей-диэлектриков и т.д. Величина потенциалов зарядов статического электричества может достигать десятков киловольт [49, 50]. При возникновении высокого потенциала происходит пробой. Такие явления возможны в газовых средах (метан в шахтах, пылевые смеси), при перекачке жидкого топлива, в твердых системах. Основной способ борьбы с этим – надежное заземление оборудования.

Увеличить объемную проводимость для стока возникающего потенциала можно с помощью внесения в систему графита, ацетиленовой сажи, алюминиевой пудры, а в жидкие диэлектрики – специальных добавок антистатиков (если это не влияет на последующие процессы). При невозможности использования таких мер можно повысить влажность среды либо наносить антистатические средства на оборудование. Интенсивность генерации зарядов можно уменьшить соответствующим подбором пар трения или смешиванием материалов таким образом, что в результате трения один из смешиваемых материалов наводит заряд одного знака, а другой – другого. В настоящее время разработан комбинированный материал из нейлона и дакрона, обеспечивающий защиту от статического электричества по этому принципу [49].

В некоторых случаях предварительная обработка электростатическим полем жидкого топлива перед горением подавляет процесс [16].

2.2. Промотирование

Здесь уже необходимы меры, которые могут привести к последующему быстрому зажиганию, возникновению устойчивого пламени. Но до этого момента реакция не должна начинаться. Для газов – это предварительный нагрев, повышение давления, использование активаторов, электрического поля. Для жидкостей – распыление, нагрев, перемешивание. Но, конечно, нельзя превышать разумные пределы подготовительных операций, чтобы не привести систему к преждевременному воспламенению.

Для твердых веществ пригодны все действия, как и для жидкостей. Но имеются и особые, например, механоактивация [19, 51]. Другим подходом оказывается добавление к твердому топливу жидких горючих компонент для последующего более легкого инициирования и улучшения условий стабильного горения [52], либо пропитка твердой основы парафинистыми продуктами. Как, например соломки спичек [48], которые продолжают устойчиво гореть после воспламенения головки.

3. Воспламенение

3.1. Ингибирование

На начальном этапе воспламенения при небольших температурах необходимо затормозить процессы возникновения цепей, особенно чувствительные для реакций разветвления. Уместны добавки, которые эффективно переводят достаточно активные частицы в менее активные. Обычно в этой роли выступают хлориды, фосфор и азотсодержащие вещества [35].

В жидкие углеводородные топлива вводят антидетонаторы. Они предотвращают переход дефлаграционного горения в детонационный режим [53]. Твердые горючие вещества в некоторых случаях защищает поверхностный слой антипиренов. При наличии ингибиторов в массе твердого материала они оказывают химическое торможение реакций в твердой фазе, а при переходе в зону горения – в газовой.

Вопросы воспламенения и гашения ракетных твердых топлив по стадиям достаточно подробно рассмотрены в [54].

3.2. Промотирование

Здесь применимы почти все рассмотренные ранее способы промотирования. Они облегчают этапы инициирования, способствуют активации протекающих реакций. В результате начало взаимодействия компонентов происходит раньше, с меньшей энергией, при меньших температурах, облегчается переход в стационарный режим.

4. Развитие и распространение волны горения

4.1. Ингибирование

На этом этапе замедлить или даже полностью предотвратить развитие волны горения возможно посредством ввода «ловушек радикалов». Такими веществами могут быть те, которые в данной системе действуют в качестве третьего тела (флегматизаторы), либо дополнительные, которые переводят активные частицы в менее активные. На этапе перехода в стационарный режим они будут уменьшать пределы области воспламенения и горения. Потому вполне приемлемо применение хладонов, аэрозолей с неорганическими солями либо аналогично действующих добавок. Торможение реакций на стадии образования цепей при небольших температурах в предпламенной зоне приводит к некоторому снижению температуры горячей зоны.

Для твердых горючих систем свою роль играют вещества, которые образуют «экран» из корки расплава либо кокса на поверхности, вспененную массу с пониженной горючестью [41]. Доступ окислителя к поверхности затруднен.

4.2. Промотирование

Стабилизация процесса после момента воспламенения, в отличие от ингибирования, приведет к тому, что система становится саморегулирующейся. Что здесь будет положительным? Это создание повышенной концентрации активных частиц в локальном объеме, достижение большего тепловыделения в реакциях. К этому приводят обычно органические нитраты, пероксиды и аналогично действующие вещества. Добавка более активного топлива в качестве инициатора подобного перехода будет эффективной. Если в холодной зоне фронта пламени их действие оказывается очевидным, то повышение уже существующей

сверх равновесной концентрации активных частиц в горячей зоне, может быть не столь заметным.

5. Процессы в зоне догорания

Обычно считают, что она уже не влияет на начальные стадии процесса. Но если конечной целью оказывается образование газообразных продуктов, то она будет важной. При горении порохов, ракетного и авиационного топлива существенным фактором будет именно объем и скорость уходящих газов. Для большинства используемых тепловых устройств с экологической точки зрения во внимание принимаются процессы перевода продуктов неполного сгорания в конечные.

5.1. Ингибирование

Ингибировать снижение концентрации активных частиц в этой зоне горения газов и жидкостей затруднительно. Остановить процесс на этой стадии для газовых систем сложно. Эффективным представляется использование флегматизаторов. Хотя применять добавки, способные взаимодействовать в данной части пламени с активными частицами, наверное, рационально. Один из реальных способов подавления горения твердых топлив – это образование на конечной стадии негорючего либо слабо горючего каркаса на поверхности горящего полимера [41]. В результате уменьшения прогрева прилегающей зоны исходного полимера замедлится процесс его разложения и образования горючей смеси.

5.2. Промотирование

Промотирование чаще всего необходимо для перевода продуктов неполного сгорания в конечные. Часто именно наличие сажи, оксида углерода(II), оксидов азота NO_x , повышенное дымообразование снижает КПД множества устройств, вредно влияет на окружающую среду. Катализаторы горения снижают перевод азота из воздуха либо компонентов смеси в опасные оксиды [55, 56].

Возникновение сажи при горении дизельных топлив начинается в областях, где содержание кислорода недостаточно. В результате частичной дегидрогенизации, крекинга молекул топлива образуются микрочастицы сажи. В дальнейшем часть микрочастиц сажи выгорает в очагах пламени, а оставшиеся образуют

дым. Ослабить интенсивность образования дыма (фактически улучшая процесс) можно или повысив интенсивность выгорания микрочастиц сажи, или снижая интенсивность их образования. Современные противодымные присадки содержат кальций, барий, марганец и ряд других элементов. Антисажевые присадки фактически представляют из себя катализаторы горения сажи. Металлы (церий, железо, медь), составляющие основу антисажевых присадок, чаще всего вводят в топливо в виде солей карбоновых кислот. Они снижают температуру выгорания сажи до температуры отработавших газов.

Все предыдущее обсуждение проводилось с точки зрения либо достижения полноты и скорости сгорания, либо торможения процесса горения. Возможность управления горением оказалась полезной для получения промежуточных углеродных материалов (ПЦАУ, фуллеренов, графенов, наночастиц) на стадии неполного сгорания. Данный метод открыл новую и обширную область исследований [57]. Понимание важных факторов последовательных превращений исходных компонентов в пламени, их исследование с помощью различных физико-химических методов позволяет целенаправленно получать разнообразные вещества с необычными свойствами. Этот подход показывает еще неизученные возможности применения пламен.

6. Заключение

1. Для выбора оптимального способа промотирования либо ингибирования горения необходимо полное понимание физико-химических превращений всех компонентов горючей смеси по фронту пламени, выявление ведущих и лимитирующих факторов. Наиболее чувствительными являются начальные этапы инициирования и последующего перехода процесса в стационарный режим.

2. Добавки при горении претерпевают превращения, потому наряду с их начальным действием следует учитывать реакции возникающих из них частиц с другими частицами в пламени. Влияние внешних физических воздействий и химических добавок отличается в бедных, стехиометрических и богатых смесях.

3. Ингибиторы приводят к обрыву цепей, переводу активных частиц в менее активные и конечные продукты в предпламенной зоне, либо создают условия уменьшения потока тепла из горячей зоны в зону прогрева (это

важно для жидких и твердых топлив). В пожаротушении рациональным оказывается совместное применение воды, пен, ингибиторов и комплексных добавок.

4. Промоторы представляют собой инициаторы цепных процессов, более активное топливо, некоторые промежуточные продукты для данной системы. Внешние физические факторы способствуют активации частиц, ускорению соответствующих реакций, интенсификации перемешивания смеси. Способы определяются конкретными горючими системами.

5. Перспективными можно полагать подбор составных промоторов или ингибиторов для объединения воздействий в разных зонах одновременно, а также осуществление совместного влияния добавок и внешних физических способов, что может обусловить синергизм.

6. Проведение процесса горения до стадии образования ряда промежуточных веществ показывает возможности применения пламени в качестве химического реактора, что позволяет получать целевые продукты с необычными свойствами.

Литература

- [1]. Колесников Б.Я., Манжос В.К., Колесников А.Б. Деструкция алканов в низкотемпературной зоне бунзеновских атмосферных пламен // Горение и плазмохимия. – 2017. – Т.15, №3. – С.218-227.
- [2]. Fristrom R.M. Flame Structure and Processes// Oxford University Press. – 1995. – P.528.
- [3]. Dixon-Lewis G. Structure of laminar flames//23rd. Symp. (Int.) on Combustion. – Pittsburgh,1991. – P.305-324.
- [4]. Ксандопуло Г.И., Дубинин В.В. Химия газофазного горения. -М.:Химия,1987. – 240 с.
- [5]. Fialkov A. B. Investigations on ions in flames // Progress in Energy and Combustion Science – 1997. – №5-6 (23). – P.399-528.
- [6]. Манжос В.К. Изучение структуры фронта углеводородных пламен с ингибирующими и промотирующими добавками. Диссертация на соискание степени кандидата химических наук. Алма-Ата, 1984. – С.163.
- [7]. Манжос В.К., Колесников Б.Я. Промотирование горения. // «Депонированные научные работы». М., 1987. – №4 (186). – С.192.
- [8]. Бабкин В.С. Фильтрационное горение газов. Автореф. дис. докт. физ.-мат. наук: Москва, 1993. – С.67.
- [9]. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов – М.: Недра, 1985. – 308 с.
- [10]. Загрутдинов Р.Ш., Нагорнов А.Н., Рыжков

- А.Ф., Сеначин П.К. Технологии газификации в плотном слое. – Барнаул: ОАО «Алтайский дом печати», 2009. – 296 с.
- [11]. Футько С.И. Химическая структура волн фильтрационного горения обедненных и обогащенных метановоздушных смесей. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. – 2003. – С.21.
- [12]. Футько С.И., Жданок С.А. Химия фильтрационного горения газов. – Минск: Бел. наука, 2004. – 318 с.
- [13]. Кумагаи С. Горение. – М.: Химия, 1979. – 256 с.
- [14]. Максимов Ю.М., Мержанов А.Г., Кирдяшкин А.И. Влияние ультразвуковых колебаний на горение системы титан-бор // Мат-лы 3-й Всес. конф. по технологическому горению. – Черногловка, 1981, – С.53–55.
- [15]. Решетников С.М., Зырянов И.А. Влияние электростатического поля на макрокинетику горения алканов и керосина // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – №1. – С.120–128.
- [16]. Зырянов И.А. Влияние электростатического поля на ламинарное горение углеводородных жидкостей. Дисс. на соиск. степени канд. техн. наук, Казань, 2011. – С.106.
- [17]. Решетников С.М., Зырянов И.А., Позолотин А.П. Аномальное поведение алканов и каучуков при горении в электрическом поле // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №15. – С.44–49.
- [18]. Позолотин А.П. Горение полимеров в электростатическом поле. Дисс. канд. техн. наук: Киров, 2013. – С.97.
- [19]. Болдырев В.В. Исследования по механохимии твердых веществ // Вестник РФФИ. – 2004. – №3. – С.40–62.
- [20]. Попов В.И. Влияние механохимической активации и микропомолы на интенсивность горения твердого топлива // Химия твердого топлива. – 2017. – №1. – С.36–43.
- [21]. Исмагилов З.Р. Исследование дезактивации и изменения текстурно-механических свойств катализаторов КГТ в условиях сжигания различных топлив // В сб.: Проблемы дезактивации катализаторов. – Новосибирск, 1985. – С.74–96.
- [22]. Пармон В.Н., Симонов А.Д., Садыков В.А., Тихов С.Ф. Каталитическое сжигание: достижения и проблемы // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т.51, №2. – С.5–13.
- [23]. Андреев В.К., Мальцев В.М. Связь кинетики десорбции при термовакuumной обработке безгазовых составов с характеристиками их горения (на примере состава титан-бор) // В сб.: I Всес. Симпозиума по макроскопической кинетике и хим. газодинамике. – Черногловка, 1984. – С.123–124.
- [24]. Nir E.C. An experimental study of the low pressure limit for steady deflagration of ammonium perchlorate // Combust. and Flame. – 1973. – Vol.3. – P.419–435.
- [25]. Starikovskiy A., Aleksandrov N. Plasma-assisted ignition and combustion // Progress in Energy and Combustion Science. – 2013. – №1. – P.61–110.
- [26]. Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Осадчая Э.Ф. Плазменная переработка топлив // VIII Всероссийская конференция «Горение твердого топлива» Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2012 г.
- [27]. Шибков В.М., Шибкова Л.В. и др. Влияние поверхностного СВЧ-разряда на воспламенение высокоскоростных пропан-воздушных потоков // Теплофизика высоких температур. – 2011. – №2 (49). – С.163–176.
- [28]. Бунев В.А. О механизме промотирования и ингибирования окисления богатых воздушных смесей водорода оксидами азота NO и NO₂ при адиабатическом воспламенении // Физика горения и взрыва. – 2011. – №1. – С.22–29.
- [29]. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Ч. 1. Изд. 2-ое. перераб. и доп. – М.: Асс. «Пожнаука», 2004. – 713 с.
- [30]. Братков А.А., Шимонаев Г.С., Горенков А.Ф. и др. Теоретические основы химмотологии, – М.: Химия, 1985. – 315 с.
- [31]. Гришин Н.Н., Середа В.В. Энциклопедия химмотологии. – М., Издательство Перо, 2016, – 959 с.
- [32]. Патент 2378323. РФ, МПК C10L №1/10, 1/12. Присадка к дизельному топливу, дизельное топливо // И.Н. Гришина. – Оpub. 10.01.2010; Бюл. № 1.
- [33]. Патент 2371469. РФ, МПК C10L1 № 1/04, 1/06, 1/23. Топливная композиция для двигателей внутреннего сгорания с искровым воспламенением // Э.В. Вельд, А.Г. Деревянко. – Оpub.: 27.10.2009; Бюл. №30.
- [34]. Водяник В.И. Взрывозащита технологического оборудования. – М.: Химия, 1991. – 256 с.
- [35]. Баратов А.Н. Горение – Пожар – Взрыв – Безопасность. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. – 364 с.
- [36]. Чазов Г.А., Азаматов В.И., Якимов С.В., Савич А.И. Термогазохимическое воздействие на малодобитные и осложненные скважины. – М., Недра, – 1986. – 150 с.
- [37]. Патент 2483088, РФ, МПК C08L №25/06, C08J № 9/16, C08F №8/18, C08G №63/682. Бромированные полимеры в качестве пламягасителей и содержащие их полимерные системы / Б. А. Кинг, А. Уорку, У. Д. Стобби. – Оpub. 27.05.2013; Бюл. №15.
- [38]. Князев В.К., Сидоров Н.А. Облученный полиэтиленвтехнике.–М.:Химия,1974.–376с.

- [39]. Патент 2522433. РФ, МПК C07F №9/165, 9/173, 9/177, C08K №5/5398, C08J №9/00, C08L №101/12. Фосфорно-серные огнезащитные добавки и полимерные системы, содержащие их / Р.Б. Шанкар, У.Дж. Крупер, и др. – Оpub.10.07.2014; Бюл. №19.
- [40]. The Chemistry and Use of Flame Retardants // Lyons J.W., Ch. 2: Chemistry of Fire Retardants Based on Phosphorous. – John Wiley & Sons, Inc. 1987. – P.29–74.
- [41]. Варфоломеев С., Ломакин С., Сахаров П. Антипирены: российский период // Химический журнал. – 2010. – С.42–45.
- [42]. Андрианов К.А. Синтез и модификация полимеров. – М.:Наука, 1976. – 223 с.
- [43]. Бунев В.А., Намятов И.Г., Бабкин В.С. О механизме ингибирования пропаном пламени водорода // Хим. физика. – 2007. – №9. – С.39–45.
- [44]. Denisov E.T., Azatyan V.V. Inhibition of Chain Reactions. Monograph. – London.: Gordon and Breach Publ. Company Science Publishers, 2000. – 337 p.
- [45]. Азатян В.В., Шебеко Ю.Н. и др. Ингибирование горения водородовоздушных смесей добавками спиртов // XII Симпозиум по горению и взрыву. Часть 1, – Черногловка, 2000. – С.6–7.
- [46]. Бунев В.А., Большова Т.А., Бабкин В.С. Численное исследование распространения ламинарного пламени в богатых водородовоздушных смесях с добавкой этанола // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т.52, №3. – С.3–7.
- [47]. Папок К.К., Рагозин Н.А. Словарь по топливам, маслам, смазкам, присадкам и специальным жидкостям (химмотологический словарь). Изд. 4-ое, пер. и доп. – М.: «Химия», 1975. – 392 с.
- [48]. Патент 2258058, РФ, МПК C06F3/08, C06B29/12. Композиция зажигательной массы для изготовления спичек // В.Э. Островский, Н.С. Ильницкий, В.Г. Нарсеев, – Оpub. 10.08.2005.
- [49]. Белов С.В., Ильницкая А.В., Козьяков А.Ф. и др. Безопасность жизнедеятельности. Учеб. для ВУЗов; 7-е изд. – М.: Высшая школа, 2007. – 616 с.
- [50]. Бесчастнов М.В., Соколов В.М., Кац М.И. Аварии в химических производствах и меры их предупреждения. – М.: Химия, 1976. – 368 с.
- [51]. Воюев С.П., Маслов В.М. и др. Механоактивация воспламенения и горения порошка титана // Физика горения и взрыва. – 1983. – №3. – С.18–22.
- [52]. Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермяков Б. А. Теплогенерирующие установки: Учеб. для ВУЗов/ – М.: Стройиздат, 1986. – 559 с.
- [53]. Нефтепродукты, свойства, качество и

применение. Справочник под ред. Б.В. Лосикова. – М.: Химия, 1966. – 776 с.

- [54]. Тимнат И. Ракетные двигатели на химическом топливе. – М.: Мир, 1990. – 294 с.
- [55]. Данилов А.М. Применение присадок в топливах: справочное издание. – М.: Мир, 2005. – 288 с.
- [56]. Лернер, М.О. Химические регуляторы горения моторных топлив. – М.: Химия, 1979. – 224 с.
- [57]. Букейханов Н.Р., Ауелханкызы М., Мансуров З.А. Некоторые проблемы конструирования и управления химическими процессами. – Алматы: Қазақ университеті, 2015. – 257 с.

References

- [1]. Kolesnikov BYa, Manzhos VK, Kolesnikov AB (2017) Alkane destruction in the low-temperature zone of atmospheric bunsen-type flames. Combustion and plasma chemistry 15:218–227.
- [2]. Fristrom RM (1995) Flame Structure and Processes. Oxford University Press, Oxford, UK. P.526. ISBN 0–19–507 151–4.
- [3]. Dixon-Lewis G. Structure of laminar flames // 23rd. Symp. (Int.) on Combustion. Pittsburgh, 1991. P. 305–324. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(06\)80274-2](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(06)80274-2)
- [4]. Ksandopulo GI, Dubinin VV (1987) Chemistry of gas-phase combustion [Himiya gazofaznogo goreniya]. Chemistry, Moscow, Russia. (in Russian)
- [5]. Fialkov A (1997) Prog Energ Combust 23:399–528. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(97\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(97)00016-6)
- [6]. Manzhos VK (1984) Study of the structure of the front of hydrocarbon flames with inhibiting and promoting additives [Izuchenie struktury fronta uglevodородnyh plamen s ingibiruyushchimi i promotiruyushchimi dobavkami]. Dissertation for the degree of candidate of chemical sciences, Almaty, Kazakhstan. P.163.
- [7]. Manzhos VK, Kolesnikov BYa (1987) Combustion promotion [Promotirovanie goreniya]. Deposited scientific works 4:192. (in Russian)
- [8]. Babkin VS (1993) Filtration combustion of gases [Fil'tracionnoe gorenie gazov]. Abstract of the dissertation of the Doctor of Physical and mathematical sciences, Moscow, Russia. P.67.
- [9]. Surguchev ML (1985) Secondary and tertiary methods of enhanced oil recovery [Vtorichnye i tretichnye metody uvelicheniya nefteotdachi plastov]. Nedra, Moscow, Russia. (in Russian)
- [10]. Zagrutdinov RSh., Nagornov AN, Ryzhkov AF, Senachin PK (2009) Dense bed gasification

- technologies [Tekhnologii gazifikatsii v plotnom sloe]. Altai Printing House, Barnaul, Russia. (in Russian)
- [11]. Futko SI (2003) Chemical structure of filtration combustion waves of depleted and enriched methane-air mixtures [Himicheskaya struktura voln fil'tracionnogo goreniya obednennyh i obogashchennyh metanovozdushnyh smesey]. Abstract of the dissertation of the Doctor of Physical and mathematical sciences, Moscow, Russia. P.21.
- [12]. Futko SI, Zhdanok SA (2004) The chemistry of filtration combustion of gases [Himiya fil'tracionnogo goreniya gazov]. Bel. Navuka, Minsk, Belarus. (in Russian)
- [13]. Kumagai S (1979) Combustion [Gorenie]. Himiya, Moscow, Russia. (in Russian).
- [14]. Maksimov YuM, Merzhanov AG, Kiryashkin AI (1981) Influence of ultrasonic vibrations on the combustion of the titanium-boron system [Vliyanie ul'trazvukovykh kolebanij na gorenie sistemy titan-bor]. Materials of the 3rd All-Union Conference on Technological Combustion, Chernogolovka, Russia. P.53–55. (in Russian)
- [15]. Reshetnikov SM, Zyryanov IA (2011) Bulletin of Kazan Technological University 1:120–128. (in Russian)
- [16]. Zyryanov IA (2011) Effect of electrostatic field on laminar combustion of hydrocarbon liquids [Vliyanie elektrosticheskogo polya na laminarnoe gorenie uglevodorodnykh zhidkostej]. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, Kazan, Russia. P.106.
- [17]. Reshetnikov SM, Zyryanov IA (2013) Bulletin of Kazan Technological University 15:44–49. (in Russian)
- [18]. Pozolotin AP (2013) Combustion of polymers in an electrostatic field [Gorenie polimerov v elektrosticheskom pole]. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, Kirov, Russia. P.97.
- [19]. Boldyrev VV (2004). Research on the mechanochemistry of solids [Issledovaniya po mekhanokhimmii tverd'kh veshhestv] Bulletin RFBR, 3:40–62. (in Russian)
- [20]. Popov VI (2017) Chemistry of solid fuel [Himiya tverdogo topliva]. 1:36–43. <https://doi.org/10.7868/S002311771701008X>
- [21]. Ismagilov ZR (1985) Investigation of deactivation and changes in the texture-mechanical properties of KGT catalysts under conditions of combustion of various fuels [Issledovanie dezaktivatsii i izmeneniya teksturno-mekhanicheskikh svoystv katalizatorov KGT v usloviyakh szhiganiya razlichnykh topliv]. In collection: Problems of catalyst deactivation. Part 1: The nature of changes in the specific catalytic activity. Novosibirsk, Russia. P.74–96. (in Russian)
- [22]. Parmon VN, Simonov AD, Sadykov VA, Tikhov SF (2015) Combustion and explosion physics [Fizika goreniya i vzryva]. 2:5–13. (in Russian)
- [23]. Andreev VK, Maltsev VM (1984) Relationship of the kinetics of desorption during thermal vacuum treatment of gas-free compositions with the characteristics of their combustion (for example, the titanium-boron composition) [Svyaz' kinetiki desorbtsii pri termovakuumnoj obrabotke bezgazovykh sostavov s harakteristikami ih goreniya (na primere sostava titan-bor)]. In Sat: I All-Union. Simp. on macroscopic kinetics and chem. gas dynamics. Alma-Ata, Kazakhstan. P.123-124. (in Russian)
- [24]. Nir EC (1973) Combustion and Flame 3:419–435. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(73\)90033-3](https://doi.org/10.1016/0010-2180(73)90033-3)
- [25]. Starikovskiy A, Aleksandrov N (2013) Progress in Energy and Combustion Science 1:61–110. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.05.003>
- [26]. Messerle VE, Ustimenko AB, Osadchaya EF (2012) Plasma processing of fuels [Plazmennaya pererabotka topliv]. VIII All-Russian Conference «Combustion of Solid Fuel» Novosibirsk, Russia. (in Russian)
- [27]. Shibkov VM, Shibkova LV (2011) Thermal physics of high temperatures [Teplofizika vysokih temperatur] 2:163–176. (in Russian).
- [28]. Bunev VA (2011) Combustion and explosion physics [Fizika goreniya i vzryva] 1:22–29. (in Russian)
- [29]. Korolchenko AY, Korolchenko DA (2004) Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them [Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ih tusheniya]. Part 1. Ed. 2nd. revised and add. Ass. Pozhnauka, Moscow, Russia. (in Russian)
- [30]. Bratkov AA, Shimonaevev GS, Gorenkov AF, etc. Theoretical foundations of chemmotology [Teoreticheskie osnovy khimmotologii] – M.: Chemistry, 1985. – 315 p. (in Russian)
- [31]. Grishin NN, Sereda VV; Encyclopedia of Chemmotology [Enciklopedia khimmotologii] – M., Pero Publishing House, 2016. – 959 p. (in Russian)
- [32]. Grishina IN (2010) Diesel fuel additive, diesel fuel [Prisadka k dizel'nomu toplivu, dizel'noe toplivo]. Patent of the Russian Federation No. 2371469
- [33]. Veld EV, Derevianko AG (2009) Fuel composition for spark ignition internal combustion engines [Toplivnaya kompozitsiya dlya dvigatelej vnutrennego sgoraniya s iskrovym vosplamneniem]. Patent of the Russian Federation No. 2371469.

- [34]. Vodyanik VI (1991) Explosion protection of technological equipment [Vzryvozaschita tekhnologicheskogo oborudovaniya]. Himiya, Moscow, Russia. (in Russian)
- [35]. Baratov AN (2003) Combustion – Fire – Explosion – Safety [Gorenie – Pozhar – Vzryv – Bezopasnost']. FGU VNIPO EMERCOM of Russia, Moscow, Russia. (in Russian)
- [36]. Chazov GA, Azamatov VI, Yakimov SV, Savich AI (1986) Thermal gas-chemical impact on marginal and complicated wells [Termogazohimicheskoe vozdejstvie na malodebitnye i oslozhnennye skvazhiny]. Nedra, Moscow, Russia. (in Russian)
- [37]. King BA, Worku A, Stobby WD (2013) Brominated polymers as flame retardants and polymer systems containing them [Bromirovannye polimery v kachestve plamyagastelej i sodержashchie ih polimernye sistemy]. Patent of the RF No. 2483088.
- [38]. Knyazev VK, Sidorov NA (1974) Irradiated polyethylene in technology [Obluchennyj polietilen v tekhnike]. Himiya, Moscow, Russia. (in Russian)
- [39]. Shankar RB, Kruper WJ, et al. Phosphorus-sulfur flame retardants and polymer systems containing them [Fosforno-sernye ognезashchitnye dobavki i polimernye sistemy, sodержashchie ih]. Patent of the Russian Federation No. 2522433.
- [40]. The Chemistry and Use of Flame Retardants //, Lyons J.W., Ch. 2: Chemistry of Fire Retardants Based on Phosphorous. – John Wiley & Sons, Inc. – P.29–74. (1987).
- [41]. Varfolomeev S, Lomakin S, Sakharov P (2010) Chemical Journal [Himicheskij zhurnal]. 1:42–45. (in Russian)
- [42]. Andrianov KA (1976) Synthesis and modification of polymers [Sintez i modifikaciya polimerov]. Nauka, Moscow, Russia. (in Russian)
- [43]. Bunev VA, Namyatov IG, Babkin VS (2007). Chemical Physics [Himicheskaya fizika] 9:39–45. (in Russian)
- [44]. Denisov ET, Azatyany VV (2000) Inhibition of Chain Reactions. Monograph. Gordon and Breach Publ. Company Science Publishers, London, UK. P.337.
- [45]. Azatyany VV, Shebeko YuN et al. (2000) Inhibition of combustion of hydrogen-air mixtures with alcohol additives [Ingibirovanie goreniya vodorodovozdushnyh smesey dobavkami spirtov]. XII Symposium on Combustion and Explosion. Chernogolovka, Russia. P.6–7.
- [46]. Bunev VA, Bolshova TA, Babkin VS (2016) Combustion and explosion physics [Fizika goreniya i vzryva] 3:3–7. (in Russian)
- [47]. Papok KK, Ragozin NA (1975) Dictionary of fuels, oils, lubricants, additives and special fluids (chemical dictionary) [Slovar' po toplivam, maslam, smazkam, prisadkam i special'nyim zhidkostyam (himnologicheskij slovar')]. Himiya, Moscow, Russia. (in Russian)
- [48]. Ostrovsky VE, Ilitsky NS, Narseev VG, Composition of incendiary mass for the manufacture of matches [Kompozitsiya zazhigatel'noj massy dlya izgotovleniya spichek] Patent of the Russian Federation No. 2258058.
- [49]. Belov SV, Ilitskaya AV, Koziakov AF and etc. (2007) Life safety [Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti]. Vysshaya shkola, Moscow, Russia. (in Russian)
- [50]. Beschastnov MV, Sokolov VM, Katz MI (1976) Accidents in chemical industries and their prevention. Himiya, Moscow, Russia. (in Russian)
- [51]. Voyuev SP, Maslov VM et al. (1983) Combustion and explosion physics [Fizika goreniya i vzryva]. 3:18–22. (in Russian).
- [52]. Delyagin GN, Lebedev VI, Permyakov BA (1986) Heat generating plants [Teplogeneriruyushchie ustanovki]. Stroyizdat, Moscow, Russia. (in Russian).
- [53]. Losikova BV (1966) Petroleum products, Properties, quality and application [Nefteprodukty, Svoystva, kachestvo i primeneniye]. Himiya, Moscow, Russia. (in Russian).
- [54]. Timnat I (1990) Chemical fueled rocket engines [Raketnye dvigateli na himicheskome toplive]. Mir, Moscow, Russia. (in Russian).
- [55]. Danilov AM (2005) The use of additives in fuels: a reference book [Primeneniye prisadok v toplivah: spravochnoe izdanie]. Mir, Moscow, Russia. (in Russian).
- [56]. Lerner MO (1979) Chemical regulators of combustion of motor fuels [Himicheskie regulatory goreniya motornykh topliv]. Himiya, Moscow, Russia. (in Russian).
- [57]. Bukeikhanov NR, Auelkhanzy M, Mansurov ZA (2015) Some problems in the design and control of chemical processes [Nekotorye problemy konstruirovaniya i upravleniya himicheskimi processami]. Qazaq university, Almaty, Kazakhstan.

BASIC CONCEPTS OF COMBUSTION PROMOTION AND INHIBITION

V.K. Manzhos¹, B.Ya. Kolesnikov²

¹B.V. Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Novosibirsk, Russia;

²Institute of combustion problems, Bogenbay Batyr str. 172, Almaty, Kazakhstan

Abstract

Over the past decades, a large number of works on the inhibition and promotion of combustion have been published. This includes both chemical additives and the use of physical influences. In-depth research in each case involves finding out the most important factors of influence and choosing the most effective way to control the process. A number of studies indicate the ambiguity of the result, depending on the amount of additives or changes in the conditions. But the reasons for such changes are not always clear. In any case, it is necessary to proceed from the relationship of the processes of inhibition and promotion in the combustion wave, the joint influence of chemical and physical actions for the selection of effective methods of combustion, inhibition of the process, or the production of new substances at the intermediate stages of incomplete combustion.

Keywords: combustion process, promoters, inhibitors, physical methods of action, the concept of the process of promotion and inhibition.

Жануды промоторлау және игнибирлеу туралы негізгі түсініктер

В.К. Манжос¹, Б.Я. Колесников²

¹В.В. Воеводский атындағы химиялық кинетика және жану институты, Новосибирск, Ресей;

²Жану проблемалары институты, Богенбай батыр к., 172, Алматы қ., Қазақстан

Аңдатпа

Соңғы онжылдықта жануды игнибирлеу және промоторлау бойынша көптеген еңбектер жарық көрді. Бұған химиялық қоспалар да, физикалық әсерлерді қолдану да жатады. Әр нақты жағдайда терең зерттеу маңызды әсер ететін факторларды анықтап, процесті басқарудың тиімді әдісін таңдауды білдіреді. Бірқатар жұмыстар қоспалардың мөлшеріне немесе жағдайлардың өзгеруіне байланысты нәтиженің түсініксіздігін көрсетеді. Бірақ бұл өзгерістердің себептері әрдайым анық бола бермейді. Қалай болғанда да, жану толқынын тежеу және жылжу процестерінің өзара байланысын, жанудың тиімді әдістерін таңдау, процесті тежеу немесе толық емес жанудың аралық кезеңдерінде жаңа заттар алу үшін химиялық және физикалық әрекеттердің бірлескен әсерін ескеру қажет.

Кілт сөздер: жану процесі, промоторлар, игнибиторлар, физикалық әсер ету әдістері, промоторлау және игнибиторлау процесі туралы түсінік.