

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ НА ГОРЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

П. К. Третьяков, А. В. Тупикин, В. Н. Зудов

Институт теоретической и прикладной механикой им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск
paveltr@itam.nsc.ru

Выполнен анализ публикаций, посвященных изучению горения углеводородовоздушных смесей при воздействии слабым электрическим полем и лазерным излучением. Особенностью экспериментального исследования авторов являлось импульсно-периодическое воздействие электрическим полем и сфокусированным лазерным излучением, не приводящее к электрическому разряду или оптическому пробое. Многочисленные экспериментальные исследования показали заметное влияние слабых электрических полей на процессы горения. Наложение электрического поля может приводить к расширению пределов воспламенения и горения топливовоздушных смесей, изменению (уменьшению или увеличению) скорости горения, смещению стабилизации горения в область бедных смесей, уменьшению концентрации вредных веществ в продуктах сгорания (например, NO_x , CO) и т. д.

Ключевые слова: слабые электрические поля, лазерное излучение, ламинарное пламя, турбулентное пламя, воспламенение.

Влияние электрических полей на устойчивость и эмиссионные свойства пламени — известное явление, исследованию которого посвящено множество работ. Приведем здесь лишь отдельные результаты. В [1] отмечено, что в случае приложения продольного электрического поля к бунзеновской горелке возможно значительное расширение пределов стабилизации пламени. Авторы объясняли это влиянием ионного ветра, вызванного взаимодействием электрического поля с хемоионизацией в пламени. В [2] получено расширение на 83 % пределов срыва ламинарного пламени предварительно перемешанной смеси метана с воздухом. В [3] проведено систематическое экспериментальное исследование воздействия электрических полей на устойчивость как ламинарного, так и турбулентного пламени. В работе [4] для ламинарного пламени пропана установлено сокращение эмиссии NO под воздействием электрического поля. В [5] для пламени метана и пропана получено уменьшение эмиссии CO более чем на порядок. При этом электрический потенциал для метана варьировался от нуля до 1 кВ. описа-

ны различные способы воздействия электрических полей на пламя. Так, например, в [6, 7] исследована возможность применения коронного разряда к пламени. Оказалось, как указано в [6], что использование коронного разряда требует в 500 раз больше энергии, чем применение электрического поля, действующего через ионный ветер.

Электрические свойства пламен изучаются с начала 1950-х годов [1–17]. Эти исследования прежде всего были направлены на нахождение и идентификацию ионов в пламенах. Помимо этого, изучались механизмы появления ионов в пламенах, а также определялось собственное электрическое поле пламени. В работах [13, 16, 17] изучалось воздействие электрического поля на пламя. Было идентифицировано около 50 типов ионов в углеводородных пламенах. Среди них такие, как C_2H_3^+ , H_3O^+ , CHO^+ , C_2H_5^+ . Была измерена концентрация ионов и найдено, что ее пик находится на фронте пламени [17]. Обнаружена небольшая концентрация отрицательных ионов (примерно 1 %, остальное — положительные ионы). В углеводородных пламенах концентрация положительных ионов изменялась от 10^9 до 10^{12} см^{-3} [16]. Концентрация ионов зависела от типа топлива и коэффициента избытка топлива. Так, максимальная концентрация ионов в ацетиленовых пламенах в 4.5 раза больше по срав-

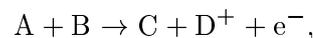
Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 99-01-00494-а, 02-01-00434-а, 05-01-00560-а и 08-01-00582-а), программы Президиума РАН «Фундаментальные аспекты магнитоплазменной аэродинамики» (П-09) и фонда Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (НШ-2414.2008.1).

нению с пропановым и метановым пламенами. Предложены различные объяснения высокого уровня ионизации пламен. Рассмотренные механизмы включали термическую ионизацию; ионизацию, вызванную электронным возбуждением; хемоионизацию. Термическая ионизация оказалась маловероятной для углеводородных пламен из-за относительно низких температур ($2\,000 \div 3\,000$ К). Механизм, связанный с электронным возбуждением, признан вполне вероятным. Хемоионизация обеспечивает производство ионов в процессе химической реакции. Возможен также механизм, связанный с ионизацией, вызванной высокоэнергетическими ионами. Хотя ни один из перечисленных механизмов полностью не отвечает за формирование ионов в пламени, но все вместе они могут дать наблюдаемую в опытах концентрацию ионов.

В углеводородных пламенах выявлено несколько типов как положительных, так и отрицательных ионов. В [9, 10] обнаружены такие положительные ионы, как $C_3H_3^+$, $C_2H_3O^+$, $C_3H_7O^+$, H_3O^+ . Основным положительным ионом, наблюдавшимся на фронте пламени, был $C_2H_3O^+$, а основным отрицательным — HSO_3^- . В [9, 10] определена зависимость ионного состава от коэффициента избытка топлива α . Из полученных результатов следует, что зависимость от $1/\alpha$ выражена достаточно резко. Так, максимальная концентрация $C_2H_3O^+$ увеличивается (примерно в 10 раз) с ростом значений $1/\alpha$ в диапазоне $0.7 \div 1.3$. Но за фронтом концентрация $C_2H_3O^+$ существенно уменьшается, на 3–4 порядка. Основным за фронтом пламени становится положительный ион H_3O^+ , и его зависимость от $1/\alpha$ проявляется не так резко. Концентрация ионов HSO_3^- и CO_3^- за фронтом пламени мала и понижается с уменьшением $1/\alpha$. Необходимо также отметить высокий уровень электронов на фронте и за фронтом пламени. Концентрация электронов сопоставима с концентрацией положительного иона H_3O^+ [9, 10]. Наличие ионов в пламени свидетельствует о возможности управления ими путем приложения электрического поля. Это было подтверждено экспериментально. Так, пламя в присутствии электрического поля было устойчивым в случае более бедных смесей. Возможность стабилизации пламени бедных смесей позволила сократить эмиссию NO.

Приложенное к пламени электрическое по-

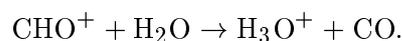
ле может изменить его характеристики только в том случае, если в нем находятся заряженные частицы. Поэтому определение механизма производства ионов в пламенах — один из важных моментов физики горения. Исследование ионов в пламенах велось достаточно активно (см. обзор [12]). Ламинарное пламя предварительно перемешанной смеси является наиболее подходящим объектом для изучения влияния ионов на процессы горения. Большинство пламен исследовалось при низком давлении, потому что в этом случае толщина пламени является достаточной для введения измерительных зондов. Проводились эксперименты и при атмосферном давлении. Одна из главных целей экспериментов — выяснить механизм появления ионов в пламенах. Эта задача включает идентификацию процессов ионизации и механизм преобразования одного иона в другой. В [18] показано, что определяющую роль в формировании ионов в пламенах играет хемоионизация. Схематически это можно рассмотреть на модельной реакции:



где A, B, C — молекулы, e^- — свободный электрон, D^+ — положительный ион. Упрощенная схема реакций для производства положительных ионов может быть представлена в виде



Однако время жизни иона CHO^+ очень мало, так как он вступает в очередную реакцию:



Измерения, выполненные в [9, 19] с использование масс-спектрометра, показали, что производство положительных ионов в пламени преобладает, а самым распространенным является ион H_3O^+ . В [9, 10] численно найден профиль концентраций ионов в ламинарных пламенах. Отмечается, что для пропановоздушной смеси в определенных условиях уровень концентраций отрицательных ионов CO_3^- , HSO_3^- может быть высок, но все же в несколько раз меньше концентраций положительных ионов.

Доля ионов в полном составе мала (обычно 1 ион на $10^6 \div 10^7$ частиц). После открытия механизма хемоионизации были активизированы работы по применению электрического поля к пламенам. Для объяснения механизма влияния электрического поля на пламя в [13]

предложена теория ионного ветра. Она заключается в следующем. На пламя действует чисто массовая сила, которая влияет на движение положительных ионов. Эта сила изменяет давление поперек пламени и тем самым влияет на геометрию пламени. В [13] указано, что изменение давления в пламени, обусловленное электрическим полем, составляет ≈ 4 мм водного столба. В расчете получено, что при напряженности электрического поля 30 кВ/см максимальная плотность тока равна 250 мкА/см².

Установлено, что за образование ионов ответственна не тепловая ионизация, а хемоионизация, т. е. образование положительных и отрицательных ионов в химических реакциях двух различных нейтральных компонентов. Это происходит при температурах, которые являются низкими для реализации тепловой ионизации. Ранние исследования в основном были сконцентрированы на идентификации реакций хемоионизации и выявлении полей ионов в пламенах в зависимости от вида топлива и коэффициента избытка воздуха. В большинстве экспериментов использовалась оптическая техника и зонд Лэнгмюра. Для того чтобы измерить ток в пламени, к нему прикладывалось электрическое поле. Получены зависимости вольт-амперных характеристик от направления приложенного электрического поля. Применение пучковой техники позволило измерить профили одиночных компонентов и по ним оценить концентрацию нейтральных компонентов, которые не могут быть измерены другими методами. Однако возникают трудности с идентификацией полученных экспериментальных данных.

Детальное исследование влияния ионного ветра на процессы горения выполнено в [14, 15], где проанализированы закономерности стабилизации пламени предварительно перемешанной смеси пропан-бутана с воздухом. Изучалась зависимость предельного объемного расхода смеси от приложенного напряжения. Установлено, что улучшение или ухудшение стабилизации пламени зависит от направления приложенного поля.

Из экспериментальных и теоретических исследований [11, 13] следует, что моделью ионного ветра можно объяснить многие явления, происходящие в пламенах при наложении электрического поля. Однако этой концепции недостаточно для того, чтобы понять, почему воздействие электрического поля на пламя столь

значительно.

Влияние электрического поля на кинетику химических реакций изучалось в экспериментах [14, 15, 20]. Отрицательное напряжение прикладывалось к сетчатому экрану, чтобы исключить стабилизирующее влияние ионного ветра. Кроме того, в топливную смесь подавали инертный газ (азот, аргон). Установлено, что с повышением прикладываемого напряжения для срыва пламени требуется все большее разбавление его азотом. Показано, что совместное воздействие электрического поля и разбавление смеси аргоном оказывает большее влияние на стабилизацию пламени, чем воздействие этих факторов по отдельности.

Что касается численного моделирования процессов воздействия электрического поля на пламя, отметим следующее. Существует ряд работ [9, 10, 21, 22], выполненных в одномерной постановке с детальной химической кинетикой процессов горения. В них исследуются процессы формирования ионов в плоском пламени при горении углеводородных топлив. Обычно эти расчеты проводятся без учета внешнего электрического поля. Работ по двумерному и трехмерному моделированию процессов воздействия электрического поля на пламя очень мало. Возможно, это связано с трудностями создания физической модели явления и с огромными вычислительными затратами. Среди единичных работ по численному моделированию отметим работу [23]. В ней проведено численное моделирование поля течения вокруг пламени заданной формы при воздействии на него электрического поля. В потоке учитывались только нейтральные компоненты и положительные ионы. Результаты указывают на сложную структуру потока вокруг пламени, в нем присутствуют тороидальные вихри и застойные зоны. В расчетах получено соответствие численных и экспериментальных значений по некоторым параметрам. Механизм формирования положительных ионов в работе не рассматривался. Плотность положительных ионов на фронте пламени была задана. При перемене полярности подобная постановка требует значительных изменений. В [24] в одномерном и двумерном приближениях построена численная модель ламинарного горения метана в воздухе при наличии слабого постоянного электрического поля. Одномерная модель создана с использованием известной программы CHEMKIN, двумерная — на основе модифици-

рованной программы ANSYS CFX-4 [24]. Получено, что основное влияние на пламя оказывает объемная сила, возникающая при наложении внешнего электрического поля. Реализуется процесс хемоионизации, и разноименные заряды движутся в противоположные стороны во внешнем электрическом поле. Полученные численные данные указывают, что процессами горения в ламинарных пламенах можно управлять. В одно- и двумерных моделях для описания процессов в пламени используется детальная кинетическая схема окисления углеводорода. Получено хорошее качественное согласование с экспериментами. Одномерная модель количественно описывает уменьшение градиента температуры на фронте пламени в присутствии электрического поля [24]. Двумерная модель способна воспроизводить двумерную картину течения, но требует дополнительного развития и верификации по экспериментальным данным.

В литературе рассматривается несколько областей возможного практического приложения пламен, управляемых электрическим полем. Перечисленные механизмы и эффекты воздействия могут найти применение в самых различных устройствах и технологических процессах. Но при этом следует правильно понимать, где и какой механизм работает и как его можно использовать.

Примером возможного воздействия электрического поля на процессы технологического горения служит процесс образования сажи при горении углеводородных горючих смесей. Известно, что во внешнем электрическом поле существуют заряженные частицы сажи, образующиеся в пламени [5, 21]. Следовательно, прикладывая различные по величине и направлению относительно фронта пламени электрические поля, можно воздействовать на процесс сажеобразования, т. е. регулировать размер и массу осаждаемых частиц, получать (либо не допускать получения) макроскопические частицы сажи, изменять их количество в пламени и т. д.

Отметим также (см. [25]) экспериментальные исследования процесса образования углеродных нанотрубок под воздействием электрического поля при горении этанола.

Результаты экспериментов по воздействию постоянного и импульсно-периодического слабых электрических полей на горение ламинарных и турбулентных пламен свидетель-

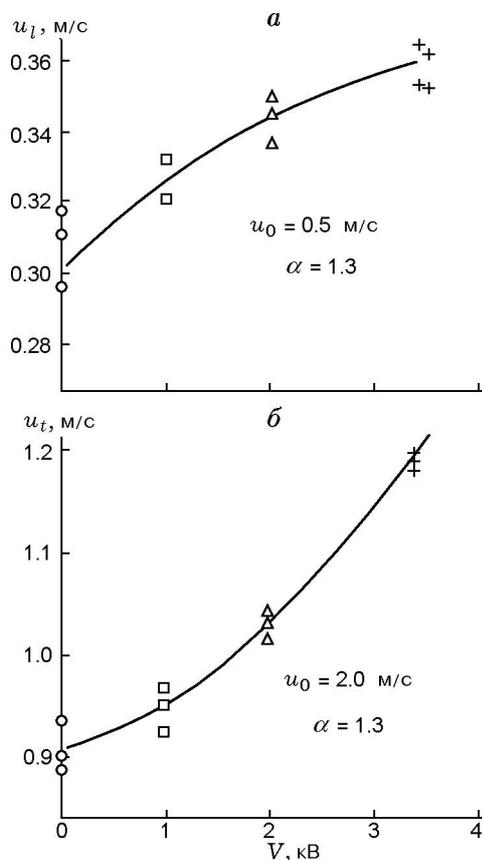


Рис. 1. Влияние электрического поля на ламинарное (а) и турбулентное (б) пламена пропана

ствуют о сложном характере процесса. Наиболее ярко это отражается на гидродинамических характеристиках процесса горения. В [26] опыты проводились для гомогенной пропановоздушной смеси. В качестве скорости распространения пламени принималась нормальная составляющая средней скорости истечения к поверхности фронта горения в ядре струи, по ее изменению определялось влияние электрического поля. Данные для постоянного поля приведены на рис. 1. В ламинарном режиме ($u_0 = 0.5$ м/с, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1.3$) скорость распространения пламени увеличивается приблизительно на 20 % при изменении напряжения до $V = 3.4$ кВ. При турбулентном режиме горения ($u_0 = 2.0$ м/с, $\alpha = 1.3$) вид зависимости скорости распространения пламени от напряжения меняется. Влияние напряжения растет, и скорость пламени в этом же диапазоне напряжения ($V = 1 \div 3.4$ кВ) увеличивается приблизительно на 30 %. Аналогичные результаты получены и для метановоздушной

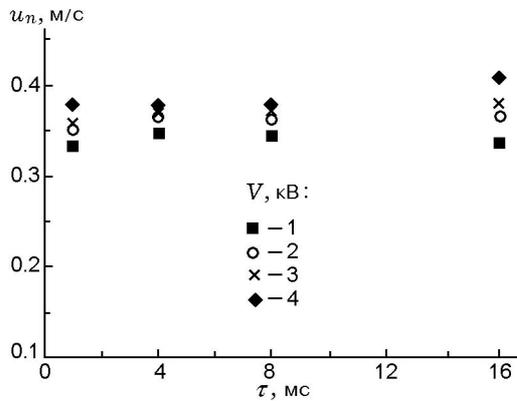


Рис. 2. Зависимость нормальной скорости распространения фронта пламени от длительности импульса ($f = 50$ Гц)

смеси [27]. Отличие в зависимостях скоростей распространения ламинарного и турбулентного пламен связано с гидродинамическими свойствами течений.

Установлено [27, 28], что для ламинарного режима скорость горения при воздействии импульсно-периодическим электрическим полем может быть выше, чем при постоянном поле. Были определены также скорости распространения ламинарного и турбулентного пламен в зависимости от напряжения, частоты и длительности электрических импульсов. Обнаружено влияние соотношения длительности импульса и характерного времени горения на характер изменения скорости распространения ламинарного фронта пламени от напряжения. Так, при скорости истечения смеси 0.5 м/с и близких значениях указанных времен влияние напряжения на скорость распространения пламени уменьшается (см. рис. 2, характерное время горения $\tau \approx 4.1$ мс при $\alpha = 1.3$).

В экспериментах было обнаружено влияние постоянного электрического поля на устойчивость пламени при переходе от ламинарного течения к турбулентному ($u_0 = 1.15$ м/с, $\alpha = 1.35$; $Re = 1500$). Так, при приложении напряжения $V = 0.5$ кВ амплитуда колебаний фронта пламени заметно уменьшалась, дальнейшее повышение вызывало рост скорости распространения пламени, без потери устойчивости. При $V \approx 2$ кВ происходила смена режима, возникал шум и появлялись пульсации фронта, которые возрастали с дальнейшим увеличением значения V .

Таким образом, при воздействии электрического поля наблюдается:

— отличие в зависимостях скоростей распространения ламинарного и турбулентного пламен, связанное с гидродинамическими свойствами течений;

— существование режимов, в которых скорость горения при воздействии импульсно-периодическим полем может быть выше, чем при постоянном поле;

— влияние соотношения длительности импульса и характерного времени горения на характер изменения скорости распространения ламинарного фронта пламени от напряжения.

Другим не менее эффективным способом управления горением может быть воздействие лазерным излучением. Ниже представлены некоторые результаты исследования, полученные авторами, с использованием сфокусированного импульсно-периодического излучения CO_2 -лазера на горение топливовоздушных смесей. Основной особенностью этих экспериментов является отсутствие оптического пробоя в потоке смеси. В литературе описаны, как минимум, четыре механизма инициации горения лазерным излучением. Первый — тепловой механизм (laser-induced thermal ignition). Энергия, поглощенная смесью, идет на увеличение поступательной температуры смеси. При достижении определенной температуры смесь воспламеняется [22, 29–33]. Второй механизм — фотодиссоциация (laser-induced photochemical ignition). Поглощение излучения средой приводит к диссоциации какого-либо сорта молекул, и это инициирует процесс горения [30, 31]. Третий механизм — лазерная искра (laser-induced spark ignition), когда плотности мощности подводимой лазерной энергии достаточно для организации пробоя среды ($10^9 \div 10^{10}$ Вт/см²) [33]. Четвертый вариант — возбуждение колебательных степеней свободы (laser-induced excitation of reactive molecules). В этом случае частью энергии лазерного излучения возбуждаются колебательные степени свободы, что способствует снижению порога реакций [22]. В случаях воздействия лазерного излучения на сформировавшееся пламя обычно ограничиваются выделением двух возможных механизмов влияния: теплового (нагрев смеси) и кинетического. При рассмотрении процессов воспламенения в различных начальных условиях определяющим может быть один из перечисленных выше механизмов, при атмосферном давлении наиболее вероятен тепловой механизм.

В работе [34] рассмотрены эффекты,

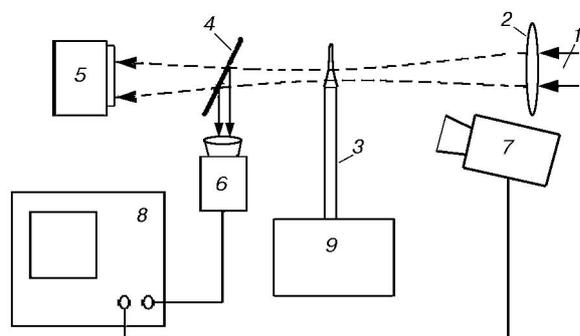


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:
1 — луч CO_2 -лазера, 2 — линза, 3 — кварцевая трубка, 4 — ответвитель, 5 — измеритель средней мощности, 6 — приемник для наблюдения формы импульса, 7 — радиометр излучения ОН, 8 — осциллограф, 9 — система подготовки смеси

возникающие при воспламенении пропано-воздушного потока излучением импульсно-периодического CO_2 -лазера. Динамика этого процесса сравнивалась с расчетом воспламенения покоящейся смеси с теми же значениями коэффициента избытка воздуха при различных начальных температурах.

На рис. 3 приведена схема экспериментальной установки. Предварительно перемешанная смесь подавалась в кварцевую трубку диаметром 13.5 мм, длиной 90 см, на выходе которой формировался ламинарный поток с параболическим профилем скорости. Излучение CO_2 -лазера фокусировалось линзой (фокусное расстояние $F = 50$ см) над срезом трубки, воспламеняя подаваемую смесь. Выделенное оптическим фильтром интегральное по пространству излучение пламени попадало на фотокатод ФЭУ-7. Для регистрации использовался цифровой двухлучевой осциллограф, запуск развертки осуществлялся сигналом с ФЭУ при воспламенении смеси. На второй луч подавался сигнал с датчика, регистрирующего излучение лазера. Использованная схема измерений позволила регистрировать динамику изменения излучения от формирующегося пламени и ее связь с параметрами импульсов лазерного излучения.

В отдельном эксперименте было определено количество лазерной энергии, поглощаемой смесью. Получена зависимость коэффициента поглощения от коэффициента избытка воздуха (рис. 4). Из данных о поглощении и параметрах падающего излучения сделана оценка температуры в зоне поглощения. Для этих условий были

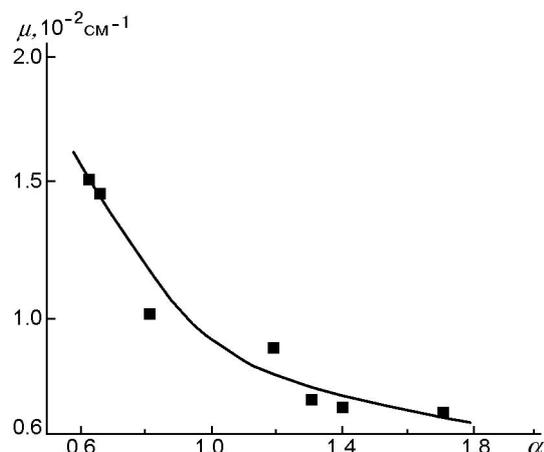


Рис. 4. Зависимость коэффициента поглощения от коэффициента избытка воздуха

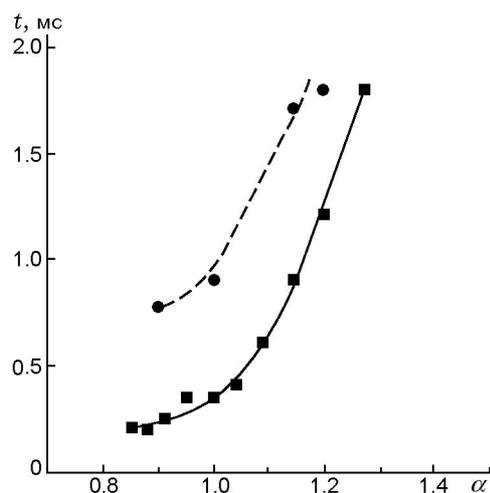


Рис. 5. Зависимость времени задержки воспламенения от коэффициента избытка воздуха: сплошная линия — эксперимент, штриховая — расчет

рассчитаны задержки самовоспламенения смеси исходя из предположения, что физический процесс происходит в адиабатических условиях и при постоянном давлении. Сравнение экспериментальных данных с рассчитанными временами (рис. 5) показало существенное отличие самовоспламенения смеси при нагреве от воспламенения лазерным излучением.

В работе [35] изложены результаты изучения воздействия сфокусированного импульсно-периодического излучения CO_2 -лазера на сформировавшиеся пламена углеводородовоздушных смесей. На рис. 6 приведены схемы стабилизации и фотографии пламени. В эксперимен-

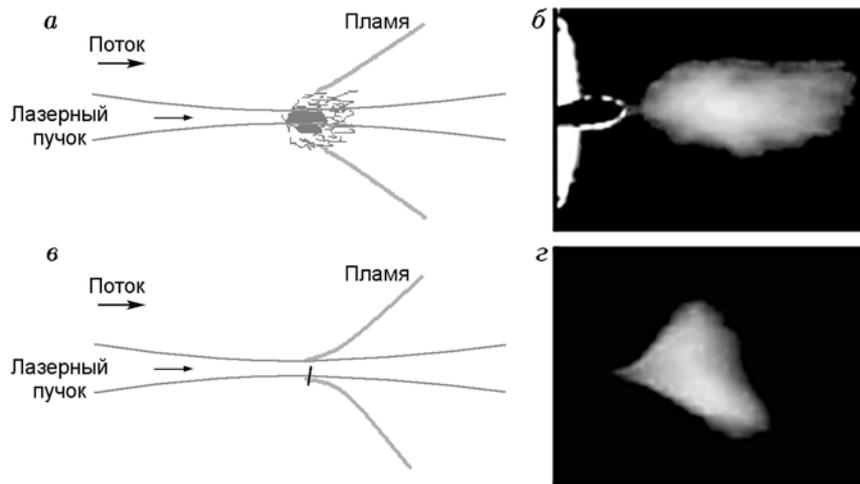


Рис. 6. Схема эксперимента и фотографии пламени:

а, б — стабилизация плазмой; в, г — стабилизация при отсутствии оптического пробоя

те регистрировались параметры лазерного излучения (средняя мощность, частота), расходы газов. Изображение пламени на линиях излучения промежуточных продуктов реакции (СН, С₂, ОН) фиксировалось на камеру технического зрения. Турбулентная скорость распространения пламени определялась в зависимости от параметров потока и излучения.

Результаты экспериментов были обобщены с использованием для описания турбулентной скорости пламени модели, в которой время пребывания в ламинарном фронте пламени (характерное время горения) является физико-химической характеристикой топливоздушной смеси. Результаты обобщения приведены на рис. 7 (u_0 — скорость потока смеси, d — размер устья струи, τ — характерное время горения). Точки 1 получены при стабилизации пламени без излучения. Стабилизации горения оптическим пульсирующим разрядом соответствуют кривая 8 и точки 2–4 ($f = 17, 30, 45$ кГц), а стабилизации горения сфокусированным излучением — кривая 9 и точки 5–7 ($f = 17, 30, 45$ кГц). В этих опытах характерное время горения более чем на порядок превышало время между лазерными импульсами.

Для изучения механизмов взаимодействия лазерного излучения с фронтом горения был выполнен цикл экспериментов с ламинарным пламенем на горелке бунзеновского типа. Предполагалось, что установление связи параметров излучения с изменением пределов горения, нормальной скоростью пламени и инте-

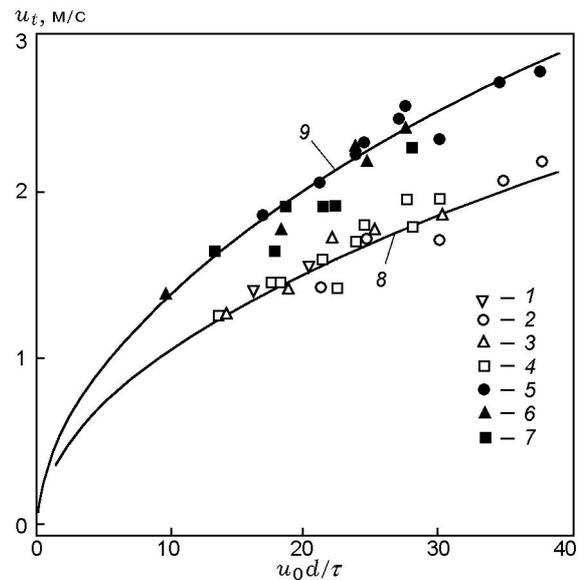


Рис. 7. Обобщенная зависимость для турбулентной скорости горения:

1 — стабилизация пламени зоной отрыва; линия 8, точки 2–4 — стабилизация оптическим зоной отрыва, $f = 17$ (2), 30 (3), 45 кГц (4); линия 9, точки 5–7 — стабилизация сфокусированным излучением, $f = 17$ (5), 30 (6), 45 кГц (7)

гральным излучением промежуточных продуктов химических реакций позволит определить механизмы воздействия. Действительно, поглощение части энергии лазерного излучения пропаном приводило к локальному разогреву смеси, что подтверждено прямыми измерениями

ями температуры в возникающем над лучом тепловом следе [36]. Наличие лазерного излучения способствовало значительному расширению предела стабилизации пламени на кромке трубки (увеличению коэффициента избытка воздуха при $u = \text{const}$). Так, при $T = 20^\circ\text{C}$ и $u = 0.9$ м/с без излучения коэффициент избытка воздуха, при котором происходил срыв пламени, равнялся $\alpha = 1.3$, а с излучением — $\alpha = 2.2$. Известно, что при такой стабилизации срыв пламени определяется критическим градиентом скорости на стенке и нормальной скоростью пламени. Локальное повышение температуры приводит к росту нормальной скорости, что, вероятно, является причиной увеличения α при срыве.

Анализ экспериментальных данных показывает, что в условиях истечения топливовоздушной смеси в свободную атмосферу воздействие лазерного излучения на ламинарное пламя носит преимущественно тепловой характер (т. е. в результате повышения температуры возрастает скорость горения и улучшаются условия стабилизации пламени). В тех же условиях наблюдается существенное отличие иницирования горения лазерным излучением от самовоспламенения смеси по тепловому механизму.

В заключение необходимо отметить:

- несмотря на большое количество выполненных исследований, остаются недостаточно изученными механизмы, вызывающие существенное изменение интегральных характеристик процесса горения при воздействии слабыми электрическими полями в отсутствие электрического разряда;

- имеется ограниченное количество работ по иницированию горения в потоке топливовоздушной смеси лазерным излучением, не приводящим к оптическому пробую;

- применение импульсно-периодических электрических полей открывает новые возможности по управлению процессом горения;

- численное моделирование эффектов влияния слабого электрического поля проводится в одномерном приближении в связи с трудностями построения пространственной, нестационарной, сопряженной физико-химической модели процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Calcote H. F., Pease R. N. Electrical properties of flames — burner flames in longitudinal electric fields // *Ind. and Eng. Chem.* — 1951. — V. 43. — P. 2726–2731.
2. Noorani R. I., Holmes R. E. Effects of electric fields on the blowoff limits of a methane-air flame // *AIAA Journal.* — 1985. — V. 23. — P. 1452–1454.
3. Сэпп В. А., Улыбышев К. Е. Экспериментальные исследования эмиссионных характеристик ламинарных диффузионных пламен в постоянном электрическом поле различной полярности // *Теплофизика высоких температур.* — 1987. — V. 35, № 5. — С. 826–829.
4. Calcote H. F., Berman C. H. Increased methane-air stability limits by a DC electric field // *Proc. ASME Fossil Fuel Combustion / S. N. Singh (Ed.).* — 1989. — P. 25–31.
5. Ватажин А. Б., Лихтер В. А., Сэпп В. А., Шульгин В. И. Влияние электрического поля на эмиссию окислов азота и структуру диффузионного ламинарного пропанового пламени // *Изв. РАН. МЖГ.* — № 2. — 1985. — С. 13–23.
6. Bradley D., Nasser S. H. Electrical coronas and burner flame stability // *Combust. Flame.* — 1984. — V. 55. — P. 53–58.
7. Ohisa H., Kimura I., Horisawa H. Control of soot emission of a turbulent diffusion flame by DC or AC corona discharges // *Combust. Flame.* — 1999. — V. 116, N 4. — P. 653–661.
8. Pedersen T., Brown R. C. Simulation of electric field effects in premixed methane flames // *Combust. Flame.* — 1993. — V. 94. — P. 433–448.
9. Rodrigues J. M., Agneray A., Jaffr'ezic X., Bellenoue M., Labuda S., Leys C., Chernukho A. P., Migoun A. N., Cenian A., Savel'ev A. M., Titova N. S., Starik A. M. Evolution of charged species in propane/air flames: mass-spectrometric analysis and modeling // *Plasma Sources Sci. Technol.* — 2007. — V. 16. — P. 161–172.
10. Starik A. M., Savel'ev A. M., Titova N. S. Kinetic processes in combustion dusty plasma // *Proc. 28th ICPIG, July 15–20 2007, Prague, Czech Republic.* — P. 2267–2270.
11. Marcum S. D., Ganguly B. N. Electric-field-induced flame speed modification // *Combust. Flame.* — 2005. — V. 143. — P. 27–36.
12. Fialkov A. B. Investigations on ions in flames // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 1997. — V. 23. — P. 339–528.
13. Lawton J., Weinberg F. J. *Electrical Aspects of Combustion.* — Clarendon, Oxford, 1969.
14. Гуляев Г. А., Попков Г. А., Шебеко Ю. Н. О влиянии постоянного электрического поля на горение смеси пропан — бутан с воздухом // *Физика горения и взрыва.* — 1985. — Т. 21, № 4. — С. 23–25.
15. Гуляев Г. А., Попков Г. А., Шебеко Ю. Н. Об эффектах синергизма при совместном действии электрического поля и инертного разба-

- вителя на газофазные пламена // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 2. — С. 57–59.
16. **Calcote H. F.** Ion production and recombination in flames // Proc. Combust. Inst. — 1962. — V. 8. — P. 184.
 17. **Calcote H. F., Kurzius S. C., Miller J.** Negative and secondary ion formation in low pressure flames // Proc. Combust. Inst. — 1967. — V. 10. — P. 605.
 18. **Green J. A., Sugden T. M.** Some observations on the mechanism of ionization in flames containing hydrocarbons // Ninth Intern. Symp. on Combustion. — Pittsburgh: The Combust. Inst., 1963. — P. 607–621.
 19. **Goodings J. M., Bohme D. K., Chun-Wai N. G.** Detailed ion chemistry in methane-oxygen flames. I. Positive ions // Combust. Flame. — 1979. — V. 36. — P. 27–43.
 20. **Tewari G. P., Wilson J. R.** An experimental study of the effects of high frequency electric fields on laser-induced flame propagation // Combust. Flame. — 1975. — V. 24. — P. 159–167.
 21. **Савельев А. М., Старик А. М.** Особенности взаимодействия ионов и электронов с наночастицами в плазме, образующейся при горении углеводородного топлива // ЖТФ. — 2006. — № 4. — С. 53–60.
 22. **Старик А. М., Титова Н. С.** О возможности интенсификации цепных реакций в горючих смесях при возбуждении электронных состояний молекул O_2 лазерным излучением // Докл. АН РАН. — 2003. — Т. 391, № 4. — С. 471–477.
 23. **Raras M. J., Dunn-Rankin D.** Modeling electric field driven convection in small combustion plasmas and surrounding gases // Combust. Theory and Model. — 2008. — V. 12, N 1. — P. 23–44.
 24. **Starikovskii A., Skoblin M., Hammer T.** Influence of weak electric fields on flame structure // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. — AIAA Paper. — N 2008-995. — 2008. — P. 20.
 25. **Qiaoliang Bao, Chunxu Pan.** Electric field induced growth of well aligned carbon nanotubes from ethanol flames // Nanotechnology. — 2006. — V. 17. — P. 1016–1021.
 26. **Гаранин А. Ф., Третьяков П. К., Тупикин А. В.** Влияние постоянного и импульсно-периодического электрического поля на горение пропано-воздушной смеси. // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 1. — С. 22–25.
 27. **Tretyakov P. K., Tupikin A. V.** Influence of electric field on the gasdynamics of combustion of the methane-air mixture // Proc. of XIV Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research. — CD. — 2008.
 28. **Tupikin A. V.** Studying of gasdynamics and combustion mechanisms under pulsed-periodic laser radiation and electric field // Ibid.
 29. **Tanoff M. A., Smooke M. D., Teets R. E., Sell J. A.** Computational and experimental studies of laser-induced thermal ignition in premixed ethylene-oxidizer mixtures // Combust. Flame. — 1995. — V. 103, N 4. — P. 253–280.
 30. **Trott W. M.** CO_2 -laser-induced deflagration of fuel/oxygen mixture // J. Appl. Phys. — 1983. — V. 54, N 1. — P. 118–130.
 31. **Молин Ю. Н., Панов В. Т., Петров А. К.** Инфрокрасная фотохимия. — Новосибирск: Наука, 1985.
 32. **Chou M., Zukowski T. J.** Ignition of $H_2/O_2/NH_3$, $H_2/air/NH_3$ and $CH_4/O_2/NH_3$ mixtures by eximer-laser photolysis of NH_3 // Combust. Flame. — 1991. — V. 87, N 2. — P. 191–202.
 33. **Phouc T. X., White F. P.** Laser-induced spark ignition of CH_4/air mixtures // Combust. Flame. — 1999. — V. 119, N 3. — P. 203–216.
 34. **Воронцов С. С., Зудов В. Н., Третьяков П. К., Тупикин А. В.** Некоторые особенности воспламенения пропано-воздушной смеси излучением CO_2 -лазера // Теплофизика и аэромеханика. — 2006. — Т. 13, № 4. — С. 667–673.
 35. **Tretyakov P. K., Vorontsov S. S., Tupikin A. V.** Effect of pulse-periodic CO_2 -laser radiation on premixed combustion of hydrocarbon fuels: Nonequilibrium processes // Combust. Flame. — 2005. — V. 1. — P. 74–83.
 36. **Vorontsov S. S., Garanin A. F., Tretyakov P. K., Tupikin A. V., Shatzkaya D. V.** Combustion of propane — air mixtures under the effect of repetitive pulse emission of CO_2 -laser // Proc. of 5th Workshop on Magneto- and Plasma Aerodynamics for Aerospace Applications, 7–10 April 2003. — M.: IHT RAS, 2003. — P. 190–193.

Поступила в редакцию 25/X 2008 г.,
в окончательном варианте — 11/III 2009 г.