

ЦЕПНО-ТЕПЛОВОЙ ВЗРЫВ И СТЕПЕНЬ ИОНИЗАЦИИ ВОДОРОДОВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ

В. Ф. Проскудин, П. Г. Бережко, Е. Н. Беляев, В. Н. Тараканов,
П. Е. Половинкин, А. Г. Лещинская

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, proskudin@dep19.vniief.ru

С использованием пассивного зонда, регистрирующего накопление сигналов «электрического шума» пламени при горении водородовоздушных смесей, установлено, что внутри концентрационных пределов интенсивного горения этих смесей, составляющих примерно $18 \div 60$ об. % водорода и обусловленных особенностями механизма взаимодействия в горящих смесях, наблюдается существенное повышение степени ионизации пламени.

Ключевые слова: водородовоздушная смесь, горение, цепно-тепловой взрыв, ионизация пламени.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] показано, что внутри концентрационных пределов распространения пламени водородовоздушных смесей, составляющих $5 \div 75$ об. % водорода при начальных нормальных условиях, существует область объемных концентраций водорода ($18 \div 60$ %), где газовые смеси горят с повышенной интенсивностью, что объясняется особенностями цепно-теплового механизма неизотермических реакций в режиме цепно-теплового взрыва. Вблизи указанных концентраций водорода в воздухе должны иметь место существенные изменения характера и скорости протекания ряда элементарных химических реакций, обеспечивающих в совокупности весь спектр разветвленно-цепных неизотермических превращений при горении водородовоздушных смесей [1]. Поэтому не исключено, что такие изменения могут сопровождаться еще и изменением степени ионизации пламени водородовоздушных смесей при переходе через указанные выше концентрационные пределы интенсивного горения.

Целью настоящей работы является оценка концентрационных пределов, внутри которых при горении водородовоздушных смесей резко возрастает степень ионизации, а также их сравнение с концентрационными пределами резкого увеличения интенсивности горения (цепно-теплового взрыва), установленными в работе [1].

Явление ионизации обнаружено давно и исследовалось в течение длительного времени [2–57]. Образование ионов в пламени газов происходит в результате термической и химической ионизации (хемионизации). При хемионизации в некоторых элементарных реакциях с участием атомов (молекул), находящихся в возбужденном состоянии, или свободных радикалов выделяется энергия, достаточная для ионизации продукта [2–29, 31–38, 40–57].

Ионообразование возможно не только в самих распространяющихся пламенах, но и проявляется в период индукции самовоспламенения горючих газов при температурах, существенно меньших температуры пламени [22, 23, 25, 27, 30, 33, 34]. В зоне сгоревших газов происходит постепенное понижение температуры и довольно быстро уменьшается концентрация ионов (и электронов) за счет электронно-ионной рекомбинации, а затем, по окончании химической реакции и охлаждении сгоревшего газа, ионизация исчезает совсем.

По степени собственной ионизации пламена газовых смесей условно можно разделить на две группы [2–7, 9, 11–13, 15, 18, 40, 43–46]. К первой группе относятся пламена, в которых экспериментально найденные концентрации ионов и электронов в зоне реакции намного превышают значения равновесных концентраций, рассчитанные с использованием эффективных потенциалов ионизации при температуре пламени по формуле термической ионизации для уравнения: нейтральный газ \rightleftharpoons ионы + электроны.

Ко второй группе относятся пламена газо-

Результаты работы частично доложены на II Международном симпозиуме «Безопасность и экономика водородного транспорта», г. Саров, 18–22 августа 2003 г.

вых смесей с низкой степенью собственной ионизации, в которых горючими являются водород, сероводород и сероуглерод, не содержащие примесей углеводородов или следов легкоионизирующихся соединений щелочных металлов. Считается, что в пламени чистых газов второй группы (H_2 , H_2S , CS_2) возможна термическая ионизация [5, 7, 11–13, 15, 45]. Но даже в так называемых «чистых» водородокислородных пламенах происходит ионизация, обусловленная наличием следов примесей углеводородов [3–7, 9, 11–13, 15, 17, 41, 43, 45, 46]. Интересно в этой связи замечание автора обзора [6] о том, что в экспериментах по регистрации ионообразования при горении смесей горючих сверхчистых газов получены плоховоспроизводимые и труднообъяснимые результаты.

В то же время было показано, что в пламени смеси $H_2: O_2: N_2$ с избытком водорода низкая степень собственной ионизации наблюдается в том случае, когда тщательно соблюдаются требования к чистоте газов и отсутствию в них таких примесей, как углеводороды и соединения щелочных металлов [41–43, 45–48]. При использовании чистого водорода в качестве газаносителя в газовом хроматографе с колонкой и ионизационным детектором, снабженным горелкой, степень ионизации газаносителя оказывается очень низкой [3].

Примеси и добавки (углеводородов, солей щелочных металлов и др.), содержащиеся в горючей газовой смеси, особенно сильно влияют на ионизацию водородокислородного пламени, где процессы собственной ионизации малоэффективны [15, 41–43, 45–48].

В литературе мы не обнаружили сведений о зависимости относительной степени ионизации водородовоздушного пламени от соотношения водород/воздух в интервале концентраций водорода, находящихся внутри концентрационных пределов распространения пламени. Имеются результаты измерения абсолютной степени ионизации (концентрации ионов) в богатых водородом пламенах, полученные методом масс-спектрометрии [3, 41–43, 45–48], а также данные отдельных измерений концентрации ионов в пламенах как богатых, так и бедных смесей, полученные методом электрических зондов [3, 13]. В работе [17] приведены результаты измерения зондовым методом степени ионизации при горении стехиометрической смеси $2H_2 + O_2 + 6N_2 + 0,005CH_4$.

Это обстоятельство усиливает интерес к

проведению исследований по оценке концентрационных пределов содержания водорода в воздухе, внутри которых наблюдается заметная степень ионизации водородовоздушных пламен. Известно, что зависимость степени ионизации как разреженных углеводородовоздушных пламен, так и соответствующих пламен при начальном давлении 1 атм от соотношения горючее/окислитель имеет экстремальный характер и проходит через максимум вблизи стехиометрического соотношения [3, 40]. На основании этих сведений можно предполагать, что и зависимость степени ионизации водородовоздушных пламен при начальном давлении 1 атм от соотношения водород/кислород (воздух) также должна иметь экстремальный характер и максимум зависимости может приходиться на область вблизи стехиометрии.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Существуют различные методы регистрации параметров ионизации пламен при воспламенении и горении газовых смесей [3–7, 10–14, 16–19, 21–28, 30–33, 35, 39, 41, 42–48, 50, 52–59]. Наиболее простым и удобным для нашего случая представляется способ, заключающийся во введении в зону горения газовой смеси пассивного металлического зонда, соединенного с одной из обкладок конденсатора, в то время как другая его обкладка соединена с заземленным металлическим корпусом камеры, в которой сжигается изучаемая газовая смесь. Если при горении газовой смеси образуется достаточно большое количество ионов и электронов, то из-за флуктуаций параметров горения, различия коэффициентов диффузии, разной подвижности заряженных частиц и из-за турбулентности горячей газовой смеси в пламени возникает так называемый «электрический шум» [14, 39]. По мере роста интенсивности горения газовой смеси в объеме камеры, в которой распространяется пламя [14, 39], увеличивается амплитуда «электрического шума» пламени. Вследствие этого на корпус камеры и пассивный зонд будет поступать разное количество как отрицательных, так и положительных зарядов, что создает переменную во времени разность потенциалов между зондом и корпусом камеры. В результате конденсатор после сгорания газовой смеси окажется заряженным до некоторого напряжения U . Если степень ионизации при горении газовой смеси в камере с

таким зондом пренебрежимо мала, то значение напряжения U будет близко к нулю.

Таким образом, по разности потенциалов между зондом и корпусом камеры в процессе горения газовой смеси (по факту зарядки конденсатора до некоторого напряжения U_{\max}) можно судить о том, сопровождалось ли горение газовой смеси определенного состава достаточно интенсивной ионизацией или нет, и оценить относительную степень ионизации пламени.

Были проведены предварительные опыты на установке, описанной в [60]. В качестве зонда использовалась пластинка из медной фольги, помещенная внутрь стальной камеры и соединенная с конденсатором емкостью 0,5 мкФ, вторая обкладка которого присоединялась к заземленному корпусу камеры. Фиксировался ток разряда конденсатора через гальванометр осциллографа Н-117. Опыты показали, что при объемной концентрации водорода в водородовоздушной смеси 30 % наблюдается ток разряда конденсатора в момент сгорания смеси, а при концентрации водорода 10 % ток отсутствует.

Эти измерения проведены на пределе чувствительности гальванометра осциллографа. И хотя они показали применимость выбранного методического подхода, для дальнейших исследований с целью обеспечения большей достоверности получаемых результатов требовались измерения с использованием более чувствительной аппаратуры. С учетом полученных предварительных результатов была собрана лабораторная установка, схема которой показана на рис. 1.

В корпусе из нержавеющей стали, представляющем собой трубу с внутренним диаметром 35 мм, закрытую с обоих концов стальными фланцами, размещена текстолитовая втулка, закрепленная герметичным стопорным устройством. Пространство между одним из фланцев трубы и торцом текстолитовой втулки образует полость (камеру) длиной 90 мм для сжигания в ней водородовоздушной смеси. На втулке закреплено шесть длинных штанг из нержавеющей стали, диаметр которых в утолщенной части (с резьбой) 4 мм, а в более тонкой (гладкой) части — 2 мм. На одной из этих штанг (позиция 2) закреплен корпус фотодиода ФД-3. Наличие большого количества штанг с резьбой на внутренней поверхности камеры сгорания обеспечивало большую

турбулентность пламени, что способствовало более эффективному проявлению «электрического шума».

Мостик накаливания из нихромовой (80Н20Х) проволоки диаметром 100 мкм и длиной 20 мм, прикрепленный к соответствующим штангам свинцово-оловянным припоем, располагался горизонтально. Еще к двум штангам крепилась вольфрамовая проволочка диаметром 20 мкм и длиной несколько миллиметров, также расположенная горизонтально. Электрические сигналы, подаваемые на нихромовую и вольфрамовую проволочки, а также сигналы, снимаемые с фотодиода и с изогнутой специальным образом штанги 5, являющейся пассивным зондом для регистрации ионизации в пламени горячей газовой смеси, передавались по проводам, проходящим через герметичные электрические вводы на корпусе. Штанга 5, изготовленная из стальной проволоки диаметром 2 мм, через герметичный электрический ввод соединена с одной из обкладок конденсатора емкостью 0,5 мкФ, вторая обкладка которого соединена с заземленным корпусом.

Предварительно вакуумированный объем корпуса заполнялся воздухом и водородом до необходимого парциального давления, обеспечивающего заданное объемное соотношение компонентов. После наполнения полости корпуса смесь перемешивалась естественным образом в течение 30 мин. Воздух в камеру вводили из рабочего помещения, а водород — из специального баллона. Начальное давление полученной таким образом газовой смеси до сжигания составляло 1 атм. Хроматографический анализ водорода из баллона показал, что в нем не содержится углеводов при пределе их обнаружения 0,01 %.

Для максимального снижения возможности ионообразования в процессе зажигания газовой смеси мостик накаливания нагревали до температуры, лишь незначительно превышающей минимальную температуру зажигания, которая для водородовоздушных смесей при диаметре нихромового мостика 0,1 мм составляла $\approx 1150 \div 1260$ К [60]. Нагрев мостика осуществлялся путем подачи на него постоянного стабилизированного электрического тока i , величина которого всего на ≈ 50 мА превышала минимальное значение тока, еще обеспечивающего воспламенение водородовоздушной смеси и рассчитываемого по формуле

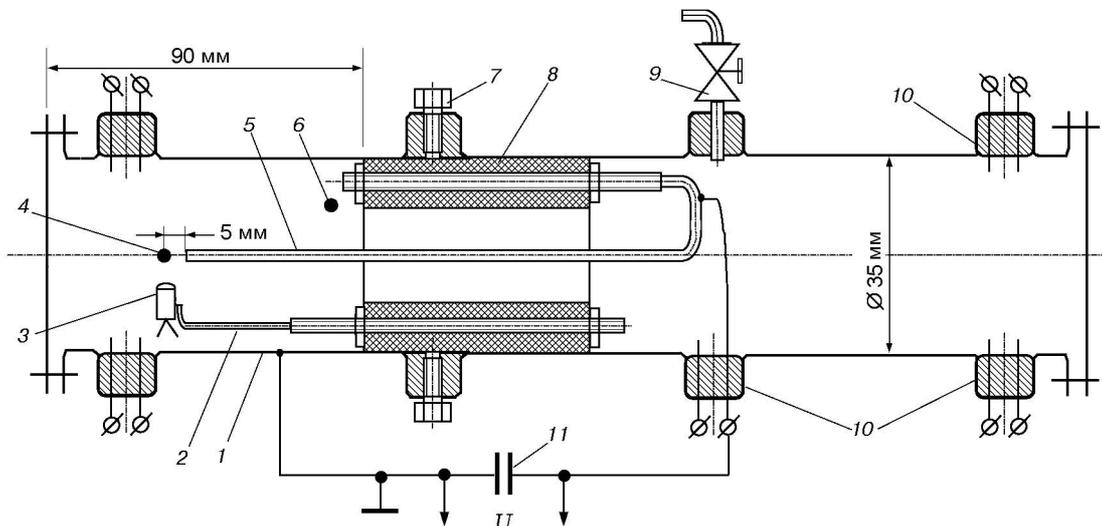


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

1 — корпус; 2 — штанга; 3 — фотодиод; 4 — мостик накаливания; 5 — пассивный зонд; 6 — вольфрамовая проволока; 7 — стопор; 8 — втулка; 9 — вентиль; 10 — электровводы; 11 — конденсатор

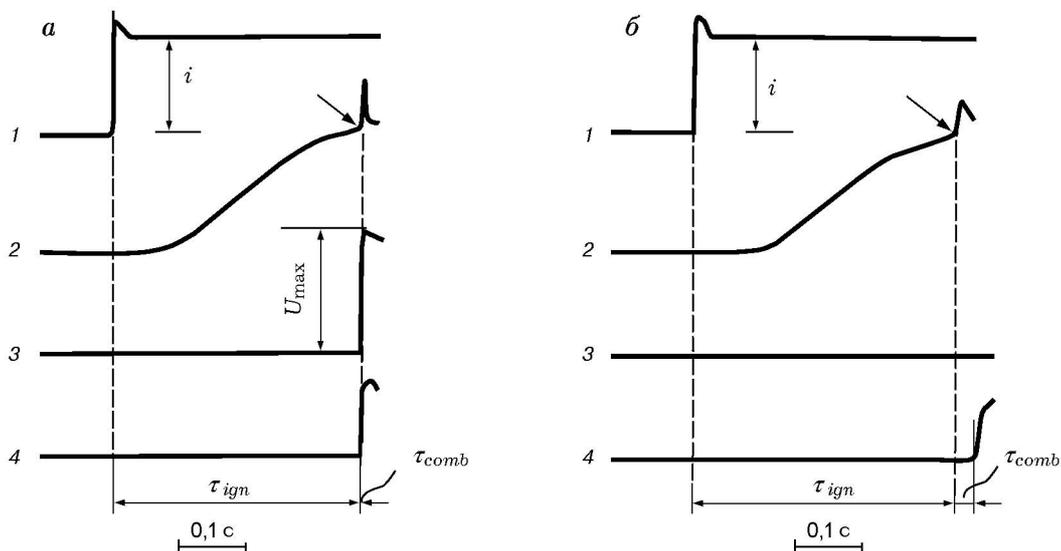


Рис. 2. Схемы типичных осциллограмм:

a — при наличии ионизации в горячей водородовоздушной смеси, *б* — при отсутствии заметной ионизации; 1 — сигнал, соответствующий величине тока, проходящего по мостику накаливания, 2 — сигнал с фотодиода, соответствующий температуре мостика и указывающий на момент загорания водородовоздушной смеси, 3 — напряжение на конденсаторе, соединенном со стальным зондом, расположенным внутри камеры, 4 — сигнал, соответствующий сопротивлению вольфрамовой проволоки; τ_{ign} — время нагрева мостика до достижения температуры зажигания газовой смеси; τ_{comb} — время горения газовой смеси в камере длиной 90 мм; стрелкой показан момент воспламенения водородовоздушной смеси; U_{max} — максимальное значение напряжения на конденсаторе, появляющееся в момент горения смеси

$$i_{0,5} = \sqrt{\frac{W_{0,5}l}{R}},$$

где $W_{0,5}$ — минимальная удельная мощность зажигания водородовоздушной смеси заданного состава (определяется по зависимости $W_{0,5}$ от содержания водорода в газовой смеси, приведенной в работе [60]); l — длина мостика; R — электрическое сопротивление мостика.

Процесс зажигания водородовоздушной смеси регистрировали по двум параметрам: по току, пропускаемому по нихромовому мостику, и по напряжению, генерируемому фотодиодом, которое зависело от изменения температуры мостика при его нагреве вплоть до момента воспламенения газовой смеси. Время от начала прохождения тока по мостику до момента воспламенения водородовоздушной смеси составляло $0,2 \div 0,4$ с.

Время завершения распространения горения водородовоздушной смеси по всему объему первого отсека трубы (в камере длиной 90 мм) фиксировали по резкому увеличению электрического сопротивления вольфрамовой проволоочки вследствие нагрева подошедшим к ней фронтом горения. Возникновение ионизации в горячей водородовоздушной смеси оценивали по появлению напряжения U на обкладках конденсатора, одна из которых была соединена со стальным зондом, размещенным внутри камеры, с одновременной регистрацией амплитуды напряжения.

Все указанные параметры регистрировали с помощью четырехканального осциллографа типа TDS420A фирмы «Tektronix» (США). Типичные осциллограммы показаны на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Опыты проводили с водородовоздушными смесями с объемным содержанием водорода $10 \div 70$ %. При этом было получено, что в диапазоне содержания водорода в газовой смеси $\approx 18 \div 60$ % на осциллограммах обнаруживается напряжение на обкладках конденсатора в момент горения газовой смеси (рис. 2, а), в то время как за пределами этого диапазона в течение всего времени горения водородовоздушной смеси конденсатор остается незаряженным (рис. 2, б). Это свидетельствует о том, что в этой области концентраций водорода ионизация при горении настолько велика, что легко определяется с помощью простого пассивного

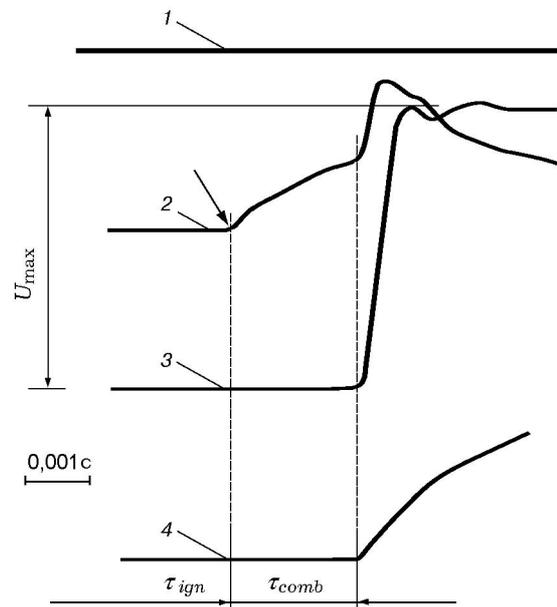


Рис. 3. «Растянутая» часть осциллограммы, показанной на рис. 2, а:

стрелкой показан момент зажигания водородовоздушной смеси

зонда, соединенного с обкладкой конденсатора. При этом благодаря техническим возможностям используемого осциллографа можно достаточно детально проследить процесс ионообразования при горении газовой смеси. Осциллограф позволяет получаемую осциллограмму «растянуть» во времени (например, на два порядка) в той зоне, где начинается воспламенение водородовоздушной смеси, а затем появляется напряжение на конденсаторе. Из «растянутых» таким образом осциллограмм (рис. 3) следует, что интенсивная ионизация начинается не в момент зажигания водородовоздушной смеси, а несколько позже, в частности, в момент, близкий к завершению горения в отсеке трубы, ограниченном торцом текстолитовой втулки (на длине ≈ 90 мм), т. е. когда начинает изменяться электрическое сопротивление вольфрамовой проволоочки, что свидетельствует о повышении температуры окружающей ее среды, обусловленном приближением к ней зоны горения. Причем на осциллограмме сигнала фотодиода наблюдается два резких перегиба. Первый перегиб, отмеченный стрелкой, отвечает моменту воспламенения водородовоздушной смеси, а второй, совпадающий по времени с моментом появления напряжения на конденсаторе (с началом интенсивной ионизации), отве-

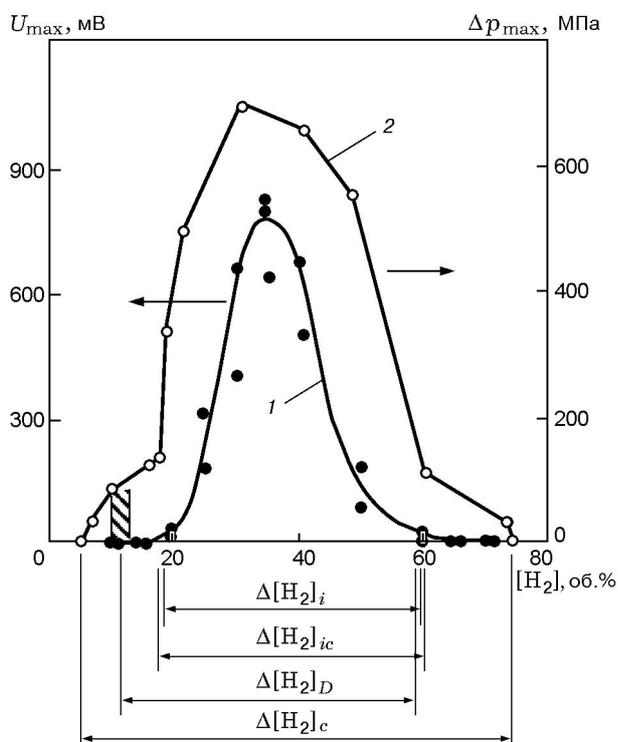


Рис. 4. Зависимость максимального напряжения U_{\max} (кривая 1) и максимального давления Δp_{\max} (кривая 2 [1]) при горении водородовоздушных смесей, зажигаемых нагретой нихромовой проволокой, от начального содержания водорода в газовой смеси:

$\Delta[H_2]_i$ — пределы повышения степени ионизации при горении смеси (наши данные); $\Delta[H_2]_c$ — пределы распространения пламени [1]; $\Delta[H_2]_{ic}$ — пределы интенсивного горения [1]; $\Delta[H_2]_D$ — пределы детонационного горения [61, 62]; штриховкой обозначена область неопределенности в оценках нижнего предела детонационного горения, обусловленная расхождением данных [61, 62]

чает резкому переходу горения в более интенсивный режим. Таким образом, видно, что процесс ионообразования во времени носит сложный характер, адекватно отвечая изменению во времени режима горения водородовоздушной смеси.

В качестве меры относительной степени ионизации горящей газовой смеси в первом приближении можно принять максимальное значение напряжения U_{\max} , появляющееся на обкладках конденсатора в процессе горения этой смеси. Тогда качественная картина изменения относительной степени ионизации горящей водородовоздушной смеси при изменении начального содержания водорода будет иметь вид кривой с максимумом в области стехио-

метрического соотношения водорода и воздуха (рис. 4). При этом концентрационные пределы интенсивной ионизации можно оценить интервалом $18 \div 60$ об. % H_2 .

Не исключено, что оценка относительной степени ионизации в пламенах газовых смесей может оказаться полезной как при интерпретации получаемых экспериментальных результатов, так и при построении расчетных моделей горения. Имеется в виду то обстоятельство, что учет химических реакций, идущих внутри концентрационных пределов повышенной степени ионизации с участием заряженных частиц, по-видимому, может дать более полную и адекватную картину физико-химических процессов, протекающих при горении газовых смесей.

Как указывалось выше, экспериментальные результаты измерения максимального давления при горении водородовоздушных смесей в случае «слабomощного» зажигания (от мостика накаливания), полученные в [1], показывают, что внутри концентрационных пределов содержания водорода $18 \div 60$ об. % наблюдается резкая интенсификация горения (кривая 2 на рис. 4). Признавая решающее значение цепно-тепловых реакций в объяснении такой резкой интенсификации горения, которое дано в работе [1], все же следует заметить, что определенную роль здесь может играть повышенная ионизация в пламени, возникающая в этих же концентрационных пределах содержания водорода в газовой смеси.

На оси абсцисс на рис. 4 дополнительно нанесены известные концентрационные пределы детонационного горения водородовоздушных смесей, которые значительно уже концентрационных пределов распространения пламени и составляют при начальных нормальных условиях по разным источникам информации $10 \div 59$ об. % H_2 [61] или $12,5 \div 59$ об. % H_2 [62]. Видно, что найденные нами концентрационные пределы интенсивной ионизации горящей водородовоздушной смеси в первом приближении достаточно близки также и к концентрационным пределам детонационного горения этой газовой смеси.

Следует указать, что в различных схемах расчета цепных реакций в водородокислородных смесях обычно учитывается только большее число элементарных стадий с участием таких активных частиц, как радикалы и свободные атомы, которые рассматриваются в том

числе и для описания цепных разветвленных реакций. При этом пока в таких схемах совершенно не учитывается вклад в образование в реакционной системе дополнительных активных центров, вносимый ионно-молекулярными реакциями [15, 63, 64], которые, в свою очередь, также могут приводить к образованию дополнительного количества радикалов и свободных атомов.

Необходимо подчеркнуть, что указания на возможную значительную роль генерации ионов в пламени в образовании активных центров (свободных атомов и радикалов) за счет ионно-молекулярных реакций и замечания о возможной роли заряженных частиц в цепном механизме газофазного горения имеются в работах различных авторов [15, 21, 26, 31, 33–35]. Напомним также, что в углеводородных пламенах последовательность быстрых ионно-молекулярных реакций может быть маршрутом для зарождения и роста частиц сажи (по так называемому ионному механизму) [33, 34, 49–57].

В развитие применяемого в настоящей работе метода оценки относительной степени ионизации в пламенах газов с использованием пассивного зонда, регистрирующего накопленные сигналы «электрического шума» пламени, было бы логично провести в будущем исследование ионизации в метановоздушном пламени. Для этой газовой смеси в работе [1] также установлено наличие концентрационных пределов интенсивного цепно-теплового взрыва, находящихся внутри концентрационных пределов распространения пламени.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ВНИИ экспериментальной физики А. И. Тарасовой и О. Б. Масленниковой за проведение газохроматографического анализа исходного водорода и У. В. Перелыгиной — за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азатян В. В., Болодьян И. А., Шебеко Ю. Н., Копылов С. Н. Особенности критических условий цепно-теплового взрыва // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 5. С. 12–23.
2. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрыв в газах: Пер. с англ. М.: Мир, 1968. С. 338–340, 459–460.
3. Лаутон Дж., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения: Пер. с англ. М.: Энергия, 1976.
4. Степанов Е. М., Дьячков Б. Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. М.: Metallurgia, 1968.
5. Похил П. Ф., Мальцев В. М., Зайцев В. М. Методы исследования процессов горения и детонации. М.: Наука, 1969. С. 45–61.
6. Пейдж Ф. Химическая реакция и ионизация в пламенах // Физическая химия быстрых реакций: Пер. с англ. М.: Мир, 1976. С. 200–290.
7. Мальцев В. М., Мальцев М. И., Кашпоров Л. Я. Основные характеристики горения. М.: Химия, 1977. С. 52–62.
8. Кондратьев В. Н., Никитин Е. Е. Химические процессы в газах. М.: Наука, 1981. С. 233–234.
9. Ксандопуло Г. И., Дубинин В. В. Химия газофазного пламени. М.: Химия, 1987. С. 9, 43–44, 46, 97, 100, 223.
10. Семенов Е. С., Соколик А. С. Исследование ионизации в сферических пламенах методом зондовых характеристик // Журн. техн. физики. 1962, Т. 32, № 9. С. 1074–1083.
11. Соколик А. С., Семенов Е. С. О природе хемиионизации пламен // Журн. физ. химии. 1964. Т. 38, № 7. С. 1784–1789.
12. Соколик А. С., Семенов Е. С. Исследование плазмы в ламинарных и турбулентных пламенах углеводородов // Низкотемпературная плазма (Тр. Междунар. симпоз. по свойствам и применению низкотемпературной плазмы, Москва, 15–17 июля 1965 г.). М.: Мир, 1967. С. 355–364.
13. Семенов Е. С., Соколик А. С. Термическая и химическая ионизация пламен // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 1. С. 37–48.
14. Фиалков Б. С., Плицын В. Т., Магун Я. И., Сенкевич Г. П. О природе «электрического шума», возникающего при горении // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7, № 3. С. 383–392.
15. Карачевцев Г. В., Тальрозе В. Л. Ионные процессы в пламени // Горение и взрыв (Материалы Третьего всесоюз. симпоз. по горению и взрыву). М.: Наука, 1972. С. 729–736.
16. Богославский В. П., Зайчиков В. В., Самойлов И. Б. О зондовых измерениях ионизации в пламени // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 5. С. 705–710.
17. Гуссак Л. А., Семенов Е. С. О профилях температуры и ионизации во фронте ламинарного пламени // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 6. С. 830–837.
18. Попов В. А. Предисловие редактора русского перевода // Лаутон Дж., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения: Пер. с англ. М.: Энергия, 1976. С. 3–11.
19. Фиалков Б. С., Щербаков Н. Д., Плицын В. Т. Распределение электрического потенциала в углеводородных пламенах // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 3. С. 87–90.

20. Аравин Г. С., Семенов Е. С. О связи между скоростями химической ионизации и реакции горения в ламинарном пламени // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 5. С. 40–46.
21. Ботова В. И., Фиалков Б. С. Распределение атомарного водорода в углеводородных пламенах и его связь с электронно-ионными явлениями // Журн. физ. химии. 1980. Т. 54, № 12. С. 3071–3074.
22. Шебеко Ю. Н., Зверев Е. Н., Ильин А. Б. и др. Ионизационные явления при самовоспламенении горючих газов и паров органических веществ // Хим. физика. 1982. № 12. С. 1721–1723.
23. Фиалков Б. С., Шебеко Ю. Н., Муравлев В. К., Ильин А. Б. Исследование электрофизических процессов при самовоспламенении газов и паров органических веществ // Кинетика и катализ. 1984. Т. 25, вып. 3. С. 535–539.
24. Фиалков Б. С., Щербаков Н. Д., Акст Н. К., Островский М. Д. Изучение влияния содержания кислорода в горячей смеси на тепло- и электрофизические параметры горения ламинарных углеводородных пламен // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 2. С. 60–63.
25. Фиалков Б. С., Шебеко Ю. Н., Муравлев В. К., Ильин А. Б. Исследование электрофизических характеристик газовых фаз при медленном окислении паров низших спиртов и кетонов в воздухе // Журн. физ. химии. 1984. Т. 58, вып. 12. С. 2964–2967.
26. Фиалков А. Б., Фиалков Б. С. Ионный состав пламен пропан — бутан — воздух при пониженном давлении // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 3. С. 32–42.
27. Ботова В. И., Зиновьев Л. А., Фиалков Б. С. Радикальные и ионизационные процессы при медленном окислении углеводородов в проточном реакторе и влияние на них гетерогенности системы // Журн. физ. химии. 1988. Т. 62, вып. 3. С. 782–784.
28. Щербаков Н. Д., Оспанов Б. С., Фиалков Б. С. Распределение отрицательных ионов в углеводородных пламенах // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 3. С. 55–59.
29. Щербаков Н. Д., Кабичев Г. И., Серов В. В. Механизм первичных реакций хемионизации в углеводородных пламенах // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 4. С. 53–56.
30. Зиновьев Л. А., Фиалков Б. С. Ионизационные процессы при окислении смеси пропан — воздух // Журн. физ. химии. 1993. Т. 67, № 3. С. 438–440.
31. Azatyan V. V., Rubtsov N. M., Ryzhkov O. T., Temchin S. M. The chemoionization in low temperature branching chain processes // Proc. of the Russian-Japanese Seminar on Combustion. Chernogolovka: Inst. of Structural Macrokinetics, 1993. P. 41–43.
32. Фиалков А. Б., Калинин К. Я. Формирование ионов NO и NH_4^+ в низкотемпературной периферийной зоне пламени // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 3. С. 11–115.
33. Ларионова И. А., Фиалков Б. С., Калинин К. Я. и др. Ионная структура и последовательность ионообразования в пламени ацетиленов // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 3. С. 93–97.
34. Фиалков Б. С., Ларионова И. А., Фиалков А. Б. Ионный состав пламени и его связь с температурным полем // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 6. С. 74–81.
35. Айвазян Р. Г. Хемионизация и роль заряженных частиц при воспламенении смесей моногермана с кислородом // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 4. С. 13–18.
36. Азатян В. Н., Рубцов Н. М., Рыжков О. Т., Темчин С. М. Кинетические особенности хемионизации в разреженных пламенах окисления дихлорсилана и моносилана при температурах, близких к комнатной, и низких давлениях // Кинетика и катализ. 1996. Т. 37, № 6. С. 805–811.
37. Азатян В. Н., Рубцов Н. М., Цветков Г. И., Черныш В. И. Влияние постоянного электрического поля на нижний предел распространения фронта пламени реакции окисления дихлорсилана в отсутствие электрического разряда // Кинетика и катализ. 1997. Т. 38, № 6. С. 805–807.
38. Старик А. М., Титова Н. С. Кинетика образования ионов при объемной реакции метана с воздухом // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 3. С. 3–19.
39. Марсден Р. С., мл. Электрический шум турбулентных пламен // Вопросы горения и детонационных волн: Четвертый симпозиум (международ.) по вопросам горения и детонационных волн / Пер. с англ. М.: Гос. изд-во оборон. промти, 1958. С. 468–472.
40. Calcote H. F. Mechanisms for the formation of ions in flames // Combust. Flame. 1957. V. 1, N 1–4. P. 385–403.
41. Knewstubb P. F., Sugden T. M. Mass-spectrometric studies of ionization in flames. I. The spectrometer and its application to ionization of hydrogen flames // Proc. Roy. Soc. Ser. A. Math. Phys. Sci. 1960. V. 255, N 1283. P. 520–537.
42. Knewstubb P. F., Sugden T. M. Mass-spectrometric observation of negative ions in flame gases // Nature. 1962. V. 196, N 4861. P. 1311–1312.
43. Green J. A., Sugden T. M. Some observations on the mechanism of ionization in flames containing hydrocarbons // The Ninth Intern. Symposium on Combustion. New York; London: Academic Press, 1963. P. 607–621.

44. **Calcote H. F.** Ion and electron profiles in flames // The Ninth Symposium (Intern.) on Combustion. New York; London: Academic Press, 1963. P. 622–637.
45. **Хейхорст А., Сагден Т.** Процессы ионизации, связанные с добавками металлов в газовые пламена // Низкотемпературная плазма (Тр. Междунар. симпоз. по свойствам и применению низкотемпературной плазмы, Москва, 15–17 июля 1965 г.) М.: Мир, 1967. С. 63–77.
46. **Hayhurst A. N., Sugden T. M.** Mass spectrometry of flames // Proc. Roy. Soc. Ser. A. Math. and Phys. Sci. 1966. V. A293, N 1432. P. 36–50.
47. **Jensen D. E., Padley P. J.** Kinetics of ionization of the alkali metals in $H_2 + O_2 + N_2$ flames // Trans. Faraday Soc. 1966. V. 62, N 524. P. 2140–2149.
48. **Hayhurst A. N., Sugden T. M.** Effect of halogens on the ionization in alkali-laden hydrogen and acetylene flames // Trans. Faraday Soc. 1967. V. 63, N 534. P. 1375–1384.
49. **Calcote H. F.** Mechanisms of soot nucleation in flames — a critical review // Combust. Flame. 1981. V. 42, N 3. P. 215–242.
50. **Calcote H. F., Keil D. G.** Ion-molecular reactions in sooting acetylene-oxygen flame // Combust. Flame. 1988. V. 74, N 2. P. 131–146.
51. **Eraslan A. N., Brown R. C.** Chemiionization and ion-molecular reactions in fuel-rich acetylene // Combust. Flame. 1988. V. 74, N 1. P. 19–37.
52. **Hayhurst A. N., Jones R. N.** The effect of metallic additives on ionization and soot formation in oxy-acetylene flames // Combust. flame. 1989. V. 78, N 3–4. P. 339–356.
53. **Gerhardt Ph., Homan K.-H.** Ions and charged soot particles in hydrocarbon flames. I. Nozzle beam sampling: velocity, energy and mass analysis; total ion concentrations // Combust. Flame. 1990. V. 81, N 3–4. P. 289–303.
54. **Wegert R., Wiese W., Homann K.-H.** Molecular beam/Wein filter application to the study of charged soot in flames: Methodology and mass distributions of particles in butadiene flames // Combust. Flame. 1993. V. 95, N 1. P. 61–75.
55. **Weilmünster P., Keller A., Homann K.-H.** Large molecules, radicals, ions, and small soot particles in fuel-rich hydrocarbon flames. Part I: Positive ions of polycyclic aromatic hydrocarbons (ПАН) in low-pressure premixed flames of acetylene and oxygen // Combust. Flame. 1999. V. 95, N 1–2. P. 62–83.
56. **Hall-Robert V. J., Hayhurst A. N., Knight D. E., Taylor S. C.** The origin of soot in flames: Is the nucleus an ion? // Combust. Flame. 2000. V. 120, N 4. P. 578–584.
57. **Balthasar M., Mauss F., Wang H.** A computational study of the thermal ionization of soot particles and its effect on their growth in laminar premixed flames // Combust. Flame. 2002. V. 129, N 1–2. P. 204–216.
58. **Козлов О. В.** Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969. С. 4.
59. **Андельфингер К.** Методы исследования быстропротекающих процессов в физике плазмы // Физика быстропротекающих процессов. Т. 3 / Пер. под ред. Златина Н. А. М.: Мир, 1971. С. 290–354.
60. **Проскудин В. Ф., Бережко П. Г., Ярошенко В. В. и др.** Минимальная удельная тепловая мощность зажигания газовых смесей как критерий их чувствительности к тепловому воздействию // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 4. С. 3–8.
61. **Водород.** Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. Справочник. М.: Химия, 1989. С. 274–275.
62. **Berman M.** A critical review of recent large-scale experiments on hydrogen-air detonations // Nuclear Sci. Engng. 1986. V. 93, N 4. P. 321–347.
63. **Ионно-молекулярные реакции в газах /** Л. И. Вирин, Р. В. Джагацпаян, Г. В. Карачевцев, В. К. Потапов, В. Л. Тальрозе. М.: Наука, 1979. С. 5–14.
64. **Ларин И. К., Тальрозе В. Л.** Ионно-молекулярные реакции // Химическая энциклопедия. М.: Сов. энцикл., 1990. Т. 2. С. 258–259.

Поступила в редакцию 17/XII 2003 г.