

03;04

Воспламенение ацетилена с помощью высоковольтного наносекундного разряда

© И.Н. Косарев, А.И. Пахомов, С.В. Киндышева,
Н.Л. Александров

Московский физико-технический институт, Долгопрудный
E-mail: nick_aleksandrov@mail.ru

Поступило в Редакцию 22 января 2013 г.

Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование воспламенения ацетилена под действием низкотемпературной неравновесной плазмы высоковольтного наносекундного разряда. Проведены измерения времени задержки воспламенения смесей $C_2H_2:O_2$ за фронтом отраженной ударной волны. Экспериментально показано, что инициирование разряда приводит к значительному сокращению времени задержки воспламенения. Эффект более выражен для бедных смесей. Выполнено численное моделирование разрядных процессов и процессов воспламенения для условий эксперимента. Получено хорошее согласие между расчетом и измерениями времени задержки воспламенения. Из анализа результатов расчета следует, что основной механизм воздействия неравновесной плазмы на воспламенение связан с наработкой атомов и радикалов в разрядной плазме.

В последнее десятилетие сформировалось и интенсивно развивается новое направление на стыке химической кинетики и физики низкотемпературной плазмы — стимулированное неравновесной плазмой воспламенение и горение топливных смесей [1,2]. Экспериментально и путем численного моделирования было показано, что под действием низкотемпературной неравновесной плазмы существенно ускоряется воспламенение топлива и оно может происходить при температурах, значительно меньших температуры термического самовоспламенения.

Ранее стимулированное плазмой воспламенение исследовалось в основном для молекулярного водорода и насыщенных углеводородов от CH_4 до C_5H_{12} [1,2]. В данной работе впервые выполнено исследование стимулированного неравновесной плазмой воспламенения ацетилена (C_2H_2). Ацетилен широко используется в технике в качестве сырья для органического синтеза и в газосварочных работах. В то же время он

рассматривается в качестве альтернативного топлива, обладая рядом ценных качеств по сравнению с традиционным топливом.

В эксперименте, выполненном в данной работе, разрядные процессы и процесс воспламенения были разделены во времени. Воспламенение происходило под действием химически активных частиц, нарабатываемых во время высоковольтного наносекундного разряда. Газовая смесь при этом предварительно нагревалась в ударной трубе за отраженным фронтом ударной волны. Это стандартный подход при измерении времени задержки самовоспламенения в горючих смесях. Для изучения влияния неравновесной плазмы использовалась специальная разрядная секция, что позволяло на одной установке измерять время задержки воспламенения как с разрядом, так и без него.

Изучались стехиометрические ($\varphi = 1$) и бедные ($\varphi = 0.5$) смеси $C_2H_2:O_2$, разбавленные на 90% (мольная доля) аргоном, где φ — стехиометрический коэффициент. Газовая температура за отраженной ударной волной изменялась в диапазоне от 1060 до 1940 К для самовоспламенения и от 1050 до 1330 К для воспламенения с помощью разряда. Давление смеси при этом лежало в диапазоне от 0.57 до 1 atm.

Детальное описание экспериментальной установки приведено в [3,4]. Ударная труба с поперечным сечением $25 \times 25 \text{ mm}^2$ имела рабочий канал длиной 1.6 m. В стенках канала, выполненных из нержавеющей стали, имелись две пары окон для оптической диагностики. Труба заканчивалась разрядной секцией длиной 20 см, выполненной из плексигласа и содержащей восемь оптических окон из кварца или MgF_2 . В конце разрядной секции помещался высоковольтный электрод. Другим электродом служила заземленная стальная секция ударной трубы.

За фронтом отраженной ударной волны достигалась температура, достаточная для самовоспламенения смеси даже в отсутствие разряда. Температура и давление смеси за фронтом определялись на основе данных по начальному составу смеси, начальному давлению и скорости ударной волны. Эта скорость измерялась с помощью трех лазерных шлирен-систем, установленных вдоль ударной трубы. Время задержки воспламенения определялось как интервал между шлирен-сигналом, соответствующим приходу в диагностическое сечение отраженной ударной волны, и началом переднего фронта излучения на длине волны 431 nm (хемолюминесценция радикала CN). Начало фронта излучения находилось по пересечению оси времени с касательной,

проведенной к точке наибольшего наклона кривой зависимости интенсивности излучения от времени.

Аналогичные измерения были выполнены и при воспламенении смеси после высоковольтного наносекундного разряда. Разряд инициировался в момент, когда отраженная ударная волна достигала диагностического сечения. Разрядные параметры измерялись с помощью двух емкостных датчиков, установленных вдоль разрядного промежутка, и магнитного датчика. Все датчики были прокалиброваны и позволяли получать абсолютные значения перепада напряжения на заданной длине между емкостными датчиками и разрядного тока. Эти данные использовались для определения эволюции во времени приведенного электрического поля E/N (N — плотность нейтральных частиц) и удельного энерговклада в разряд.

Типичное время разряда составляло несколько десятков наносекунд. Разряд развивался однородно при распространении волны ионизации от высоковольтного электрода к низковольтному [4]. За первым высоковольтным импульсом обычно следовали один или два дополнительных импульса, возникновение которых связано с частичным отражением электромагнитной волны от разрядной секции и генератора. Полное время, в течение которого наблюдались создающие плазму импульсы, не превышало $1 \mu\text{s}$, что значительно меньше времени задержки воспламенения.

Сильное отличие времени разрядной фазы от времени задержки воспламенения позволило теоретическое рассмотрение вести отдельно для каждой из этих фаз. В разрядной фазе на основе численного решения уравнений баланса активных частиц определялось их количество, наработанное в разряде, и его послесвечение. При моделировании фазы воспламенения численно решались уравнения баланса для нейтральных химических компонентов совместно с уравнением сохранения энергии, описывающим изменение во времени газовой температуры при развитии цепных реакций, приводящих к воспламенению.

Нагревом газа при развитии разряда и в его послесвечении пренебрегалось. Оценки показывают, что этот эффект в рассматриваемых условиях мал. При моделировании разрядной фазы учитывалась наработка электронно-возбужденных атомов Ar и молекул O_2 , атомов O, H и C, радикалов OH, C_2H , и CH, электронов и положительных ионов O_2^+ , Ar^+ , C_2H_2^+ , C_2H^+ и C_2^+ . Основное внимание уделялось диссоциации молекул. Поэтому не рассматривалась кинетика колебательно-

4* Письма в ЖТФ, 2013, том 39, вып. 13

возбужденных молекул и синглетных состояний O_2 , которые в рассматриваемых условиях не играют заметной роли в наработке атомов и радикалов.

Активные частицы нарабатываются в высоковольтном наносекундном разряде при диссоциации, возбуждении и ионизации атомов и молекул. Константы скорости этих процессов определяются составом смеси и параметром E/N , который менялся во времени при развитии разряда. Типичные значения E/N , при которых осуществлялся основной энерговклад, лежали в диапазоне 100–200 Td, где $1 \text{ Td} = 10^{-17} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$. Значения констант скорости электронных процессов находились из численного решения уравнения Больцмана для электронов в известном двухчленном приближении. Расчеты выполнялись для каждого момента времени во время разрядной фазы; при этом значения E/N брались из прямых измерений или восстанавливались из измерений разрядного тока. Для сечений рассеяния электронов на нейтральных частицах использовались имеющиеся в литературе самосогласованные наборы, которые позволяют получить хорошее согласие между расчетами и измерениями электронных транспортных коэффициентов и констант скорости ионизации в чистых газах при комнатной газовой температуре.

Расчеты показали, что к моменту времени $\sim 1 \mu\text{s}$ после окончания разряда основной состав активных частиц определялся невозбужденными атомами и радикалами. Их плотности использовались в качестве входных данных при моделировании стадии воспламенения. Это моделирование осуществлялось на основе кинетической схемы, разработанной в [5] для термического воспламенения углеводородов. Она включает около 560 компонентов и около 2550 химических реакций и позволяет описывать воспламенение простых углеводородов в диапазоне температур 1000–2000 К. Моделирование воспламенения выполнялось при фиксированном давлении. Время воспламенения в расчетах определялось как интервал времени между образованием активных частиц в разряде и началом эффективной наработки радикалов CH в фазе воспламенения.

На рис. 1 приведено сравнение вычисленного и измеренного времени задержки воспламенения после высоковольтного наносекундного разряда в стехиометрической смеси $\text{C}_2\text{H}_2 : \text{O}_2 : \text{Ar} = 29 : 71 : 900$ ($\varphi = 1$) и бедной смеси $\text{C}_2\text{H}_2 : \text{O}_2 : \text{Ar} = 17 : 83 : 900$ ($\varphi = 0.5$). Там же для сравнения приведены измерения времени самовоспламенения в этой смеси. Полученные данные для самовоспламенения находятся в хорошем

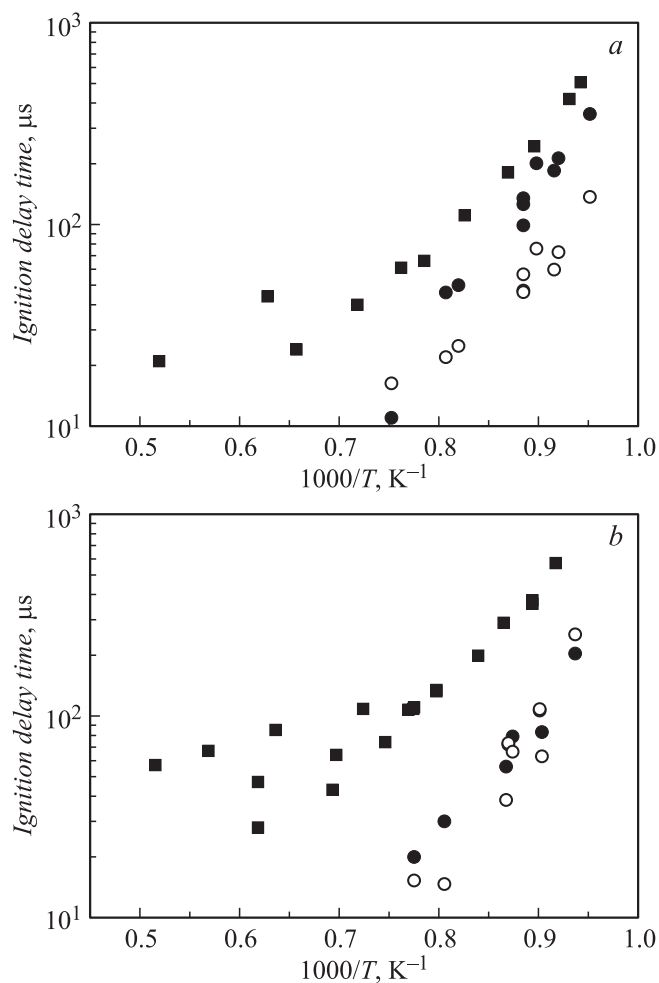


Рис. 1. Температурная зависимость времени задержки воспламенения в смеси $C_2H_2:O_2$, разбавленной на 90% аргоном: *a* — $\varphi = 1$; *b* — $\varphi = 0.5$. Квадраты — термическое самовоспламенение, кружки — воспламенение после разряда. Закрашенные символы — эксперимент, полые символы — расчет.

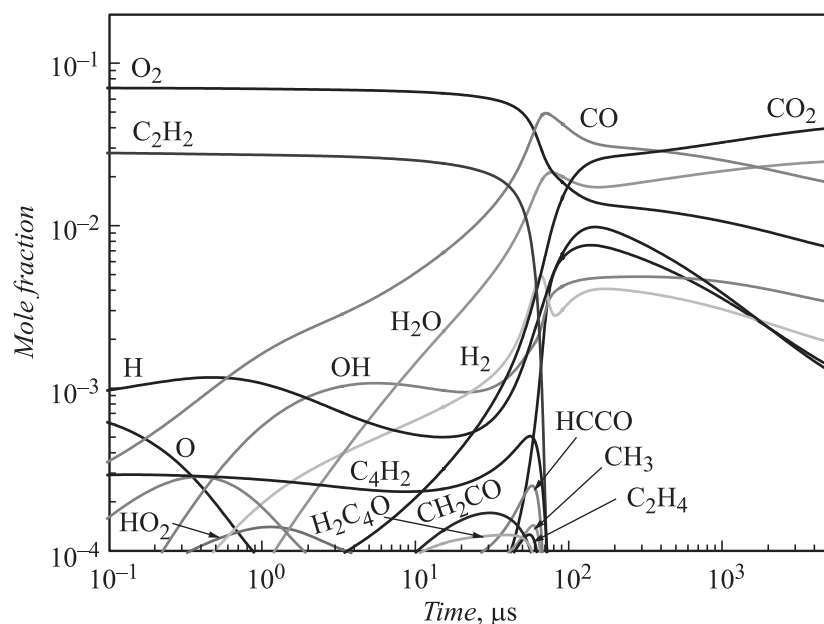


Рис. 2. Динамика изменения молярных долей основных компонентов в стехиометрической смеси $C_2H_2:O_2$, разбавленной на 90% аргоном, при ее воспламенении после разряда при начальной температуре 1130 К и давлении 0.91 atm.

согласии с другими измерениями этой величины на ударных трубах в близких условиях. Измерения и расчеты для стимулированного плазмой воспламенения ацетилена выполнены впервые.

Наблюдается хорошее согласие между расчетом и измерениями времени задержки воспламенения после разряда. Полученные результаты свидетельствуют о заметном ускорении воспламенения ацетилена под действием неравновесной разрядной плазмы. Этот эффект особенно выражен для бедных смесей, где сокращение времени задержки воспламенения при наработке активных частиц в плазме по сравнению с самовоспламенением достигает шести раз. Это особенно важно для практики, поскольку одним из перспективных направлений увеличения эффективности энергетических систем и снижения вредных выбросов является организация горения при использовании бедных смесей.

Анализ результатов расчета позволяет определить основные механизмы, лежащие в основе эффекта ускорения воспламенения под действием неравновесной плазмы. Так, из расчетов следует, что основную роль в ускорении воспламенения ацетилена играют наработанные в разряде атомы О и Н и радикалы C_2H . На временах менее $1\mu s$ они превращаются в CO , OH , H_2 и другие компоненты, стимулируя дальнейшее развитие цепных реакций и приводя к воспламенению смеси (рис. 2).

Таким образом, экспериментально и теоретически исследовано влияние высоковольтного наносекундного разряда на воспламенение ацетилена и показано, что наработка атомов и радикалов в неравновесной разрядной плазме может приводить к существенному ускорению воспламенения.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ (контракты № 11.519.11.6011 и 14.A18.21.0146).

Список литературы

- [1] *Starikovskaia S.M.* // J. Physics D: Appl. Phys. 2006. V. 39. P. R265–299.
- [2] *Starikovskii A.Yu., Aleksandrov N.L.* // Progress in Energy and Combustion Science. 2013. N 1. V. 39. P. 61–110.
- [3] *Bozhenkov S.A., Starikovskaia S.M., Starikovskii A.Yu.* // Combustion and Flame. 2003. V. 133. P. 133–146.
- [4] *Starikovskaia S.M., Kukaev E.N., Kuksin A.Yu., Nudnova M.M., Starikovskii A.Yu.* // Combustion and Flame. 2004. V. 139. P. 177–187.
- [5] *Zhukov V.P., Sechenov V.A., Starikovskii A.Yu.* // Combustion and Flame. 2005. V. 140. N 3. P. 196–203.