

ИЗМЕРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ И ВОДОРОД-КИСЛОРОДНЫХ СМЕСЕЙ В ПАДАЮЩЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ В УДАРНОЙ ТРУБЕ

В.А. Павлов

Институт Механики Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова, Россия, Москва, Мичуринский проспект, д.1.

Аннотация

Проведены исследования воспламенения водородо-воздушных и водород-кислородных смесей за падающей ударной волной в ударной трубе. Определены пределы воспламенения этих смесей за фронтом волны в интервале температур $T = 500 \div 1010$ К и давлений $P = 0.02 \div 10.8$ атм. Зарегистрированы существенно меньшие значения температуры воспламенения этих смесей по сравнению с классическими данными Льюиса, Эльбе и результатами экспериментов, полученными в отраженных ударных волнах. Времена индукции воспламенения указанных смесей измеренные в падающей ударной волне значительно меньше, нежели в отраженных волнах.

MEASUREMENT OF IGNITION LIMITS OF HYDROGEN-AIR AND HYDROGEN-OXYGEN MIXTURES BEHIND THE FRONT OF AN INCIDENT SHOCK WAVE

V.A. Pavlov

Institute of Mechanics Moscow State University, Russia, Moscow, 119192

The studies of ignition of hydrogen-air and hydrogen-oxygen mixtures behind an incident shock wave in a shock tube was made. The limits of ignition of these mixtures behind a wavefront in an interval of temperatures $T = 500 \div 1010$ K and pressures $P = 0.02 \div 10.8$ atm are spotted. The much smaller values of temperature of ignition of these mixtures recorded in comparison with classical datas Lewis B., Elbe G. and results of experiments, obtained in reflected shock waves. The times of an induction of ignition of the specified mixtures measured in an incident shock wave are much less, rather than in refiltered waves.

1. ВВЕДЕНИЕ

Пределы воспламенения горючих газовых смесей являются важнейшей характеристикой процессов горения и детонации. Большинство классических работ по определению указанных пределов в водород-кислородных смесях при различных температурах было выполнено в условиях, когда газовая смесь либо практически покоилась, либо двигалась с небольшой скоростью [1–4]. Соответствующие теоретические расчеты были ориентированы на эти эксперименты, например в работах [1–5]. Сведений по пределам воспламенения водородо-воздушных смесей очень мало. В настоящее время в связи с работами по созданию детонационного двигателя представляет интерес исследование этих характеристик в сверхзвуковых водородо-воздушных потоках. Поэтому сверхзвуковой характер течения газовой смеси за ударной волной в ударной трубе (УТ) определяет привлекательность использования этого инструмента для таких экспериментов. Большинство исследований воспламенения горючих смесей на УТ проводилось в отраженных ударных волнах (ОУВ) [6–11], где газ покоится относительно стенок УТ. При этом измеряемой величиной являлось время индукции воспламенения смеси.

Целью настоящей работы являлось определение пределов воспламенения водородо-воздушных и водород-кислородных смесей в падающих ударных волнах (ПУВ) и сравнение полученных данных с результатами экспериментов проведенных в отраженных ударных волнах.

Исследовались следующие смеси в области соответствующих температур и давлений:

28% H_2 + 72% воздух, $T = 550 \div 960$ К, $P = 0.1 \div 10.8$ атм;
67% H_2 + 33% O_2 , $T = 500 \div 1010$ К, $P = 0.02 \div 4.6$ атм.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились на ударной трубе (УТ) с внутренним диаметром 57 мм и длиной камер высокого (КВД) и низкого (КНД) давления соответственно 1 и 4.5 м. Установка снабжена системами откачки, приготовления и напуска газовых смесей. В опытах использовалась аппаратура для регистрации эмиссионных спектров, измерения скорости ударной волны и регистрации профиля давления в ударной волне (рис. 1), подробнее в работе [12]. КНД предварительно откачивалась до давления 5×10^{-4} Торр. Натекание в трубе вследствие недостаточной герметичности не превышало 10^{-4} Торр/мин. Температура и давление газа во фронте УВ варьировались в пределах $T = 500 \div 1000$ К и $P = 11 \div 0.01$ атм.

Газодинамические параметры во фронте УВ рассчитывались для каждого конкретного эксперимента с использованием программы «Gaseq» по начальным параметрам исследуемой смеси и измеренной скорости ударной волны.

Для определения скорости УВ и распределения давления газа в ней использовались пьезокерамические датчики с резонансной частотой 300 кГц и диаметром чувствительного элемента 1 мм, установленные

в стенке ударной трубы симметрично по обе стороны на расстоянии 5 см. относительно сечения наблюдения.

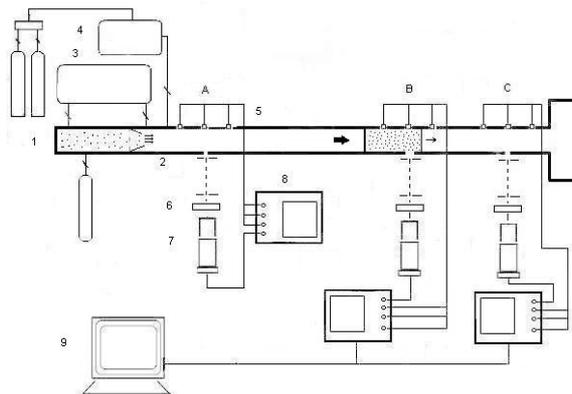


Рис. 1. 1 – КВД, 2 – КНД, 3 – система откачки, 4 – смеситель, 5 – пьезодатчики, 6 – интерференционный фильтр, 7 – фото-умножитель, 8 – осциллограф, 9 – компьютер. А, В, С – сечения наблюдения – 2.4, 4, 4.2 м от диафрагмы соответственно

В сечении наблюдения располагались кварцевые окна для ввода или вывода оптического излучения и дополнительный пьезодатчик, регистрирующий изменение давления в этом сечении. Сигналы пьезодатчиков регистрировались четырехлучевыми цифровыми осциллографами ТЕКТРОНИХ TDS-3014 и АГИЛЕНТ-54624А с полосой пропускания 100МГц, имеющими связь с компьютером. Погрешность измерения скорости УВ составляла ~0.5%. Воспламенение горючей смеси отождествлялось по появлению излучения электронно-возбужденного радикала OH^* с помощью фотоумножителя ФЭУ-100 снабженного интерференционным фильтром. Хемилюминесценция OH^* регистрировалась на длине волны 306 нм ($A^2\Sigma^+ \leftrightarrow X^2\Pi$) в спектральном интервале 10 нм, охватывающем головную часть полосы излучения. Временное разрешение спектрального канала определялось геометрией оптической схемы и составляло ~0.7 мкс.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 представлены результаты измерений пределов воспламенения в стехиометрической водородо-воздушной смеси 28% $H_2 + 72%$ воздуха (кривая 1) в интервале температур и давлений $T = 550 \div 960$ К, $P = 11 \div 0.11$ атм, соответственно. Здесь же, для сравнения схематично приведены результаты измерений указанных пределов в водород-кислородных смесях полученные Льюисом и Эльбе [4] в стационарных условиях (кривая 3). Можно отметить принципиальную разницу в характере результатов настоящей работы и [4]. Во-первых, в случае водородо-воздушной смеси в падающей ударной волне отсутствует наличие трех пределов воспламенения, характерных для горения водород-кислородных смесей. Предельная кривая (1) монотонна во всем исследуемом интервале температур. Во-вторых, при одинаковых давлениях температура воспламенения водородо-воздушной смеси в данной работе существенно ниже, нежели в водород кислородной смеси в области третьего предела (область

(а) кривой 2). Так при давлении 1.3 атм. разница в температуре воспламенения составляет 85 К.

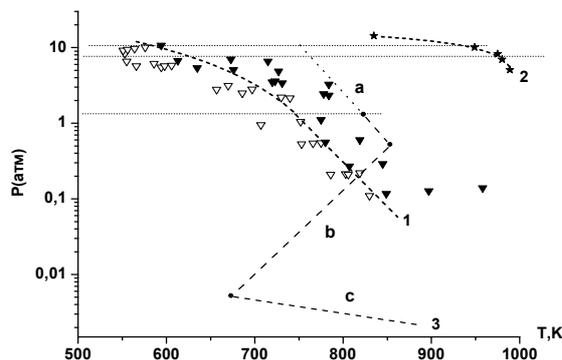


Рис. 2. Температурная зависимость воспламенения смеси 28% $H_2 + 72%$ воздух (кривая 1), кривые 2 и 3 данные работ [10] и [4], соответственно. Сплошные и контурные символы – область воспламенения и его отсутствие. Участок (а) кривой (2) – экстраполяция данных Льюиса и Эльбе [4]

Режим горения в зоне непосредственно примыкающей к предельной кривой (1) при $P = 0.3 \div 11$ атм, $T = 800 \div 600$ К, следуя например [6, 11], можно характеризовать как жесткий, и мягкий (очаговый) при $P = 0.1 \div 0.3$ атм, $T = 850 \div 800$ К. При жестком режиме волна горения расширяясь ускоряется внутри “пробки” ударно нагретого газа до сверхзвуковой скорости. Во втором случае очаг воспламенения практически движется с газовой скоростью. Однако даже при очень низких давлениях $P \sim 0.1$ атм и температуре несколько выше предельной (50 К) режим становится жестким.

Следует отметить, что сведений об экспериментах по определению пределов воспламенения неразбавленных стехиометрических водородо-воздушных смесей в падающих ударных волнах в литературе мало. Так в работе [10], посвященной измерению времени индукции воспламенения стехиометрических водородо-воздушных смесей приводится несколько предельных значений полученных в отраженной ударной волне при давлениях $2 \div 20$ атм и температурах $850 \div 966$ К рис. 2.(кривая 3). В этих условиях пределы воспламенения смеси на $300 \div 350$ К выше значений полученных в ПУВ в настоящей работе.

Представления о различии воспламенения в падающих и отраженных ударных волнах может дать сравнение времен индукции воспламенения полученных в обоих случаях. Сравнительный анализ результатов измерения времен индукции (τ) в настоящей работе и в отраженных волнах [7–10] показывает существенные меньшие значения τ полученные в ПУВ по сравнению с данными экспериментов в ОУВ.

На рис. 3 приведены результаты настоящей работы и экспериментов, проведенных авторами [7–10] в отраженных волнах. Видно, что хотя нижняя граница температур в цитируемых экспериментах лежит на 100 К выше, значения τ , измеренные в них, в 5–10 раз превышают величины, полученные в падающей ударной волне.

Такое уменьшение температуры и времени задержки воспламенения газовой смеси, возможно, связано с

особенностями возбуждения горения в ПУВ в ударной трубе. А именно наличием ударного фронта, турбулентного пристеночного пограничного слоя и турбулентного характера течения в области контактной поверхности, разделяющей толкающий и горючий газы.

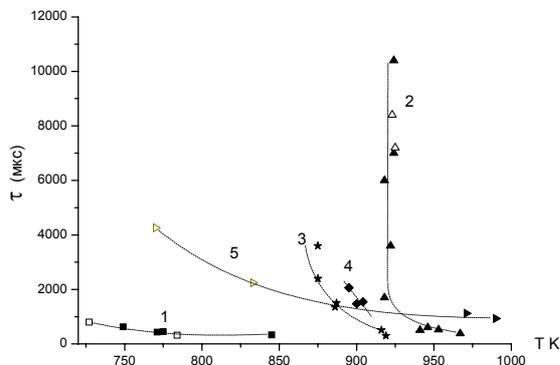


Рис. 3. Температурная зависимость времени индукции воспламенения стехиометрической водородо-воздушной смеси: 1 – настоящая работа, 2 – [7], 3 – [8], 4 – [9], 5 – [10]. На кривых 1–4 – сплошные символы соответствуют давлениям $P = 1 \div 1.4$ атм, контурные – $P = 2.4 \div 4$ атм. На кривой 5 ($P = 3.5 \div 4$ атм) контурные точки получены в результате экстраполяции реальных данных в низкотемпературную область

В работах [13–17] указывалось, что поступательная неравновесность во фронте падающей ударной волны может приводить к высокоэнергетичным столкновениям (в масштабе нескольких соударений) и соответственно инициировать различные пороговые процессы, в частности, воспламенения. Так в работе [18] сообщается об обнаружении молекул озона за ударной волной в кислороде с концентрацией $\sim 10^7 \text{ см}^{-3}$ при $T = 685 \text{ K}$, $P \sim 4$ атм. Молекулярный озон идентифицировался по поглощению света на длине волны 253.7 нм. Наличие озона может служить дополнительным источником радикалов при инициировании процесса воспламенения. Например, в работе [19] расчетами показано, что добавление в стехиометрическую водород-кислородную смесь 10^{14} молекул озона при $T = 1000 \text{ K}$ и $P = 2$ атм уменьшает время индукции почти вдвое.

Переход ламинарного пристеночного пограничного слоя в турбулентный также может способствовать зарождению воспламенения на стенке УТ [10]. В опытах Мартина для гладких поверхностей критическое число Рейнольдса перехода ламинарного погранслоя в турбулентный составляет $Re = (1 \div 3) \times 10^6$. Для воздуха согласно данным [20, 21] при числе Маха $M = 2$ в области контактной поверхности $Re \sim 3 \times 10^9 d^2 P^2$, где d – диаметр трубы и P – давление в потоке газа. В нашем случае при $d = 5.7 \text{ см}$ и $P = 0.5$ атм, $Re = 2.4 \times 10^{10}$.

Течение газа в контактной области, разделяющей толкающий и исследуемый газы, имеет также турбулентный характер и соответственно может создавать очаги воспламенения с последующим их слиянием и ускорением движения.

Наличие этих особенностей течения газа в ударной трубе может приводить к преждевременному воспламенению горючей смеси в падающей ударной волне.

В отраженной волне в ударной трубе газ практически покоится и соответственно эффекты, связанные со сверхзвуковым течением газа и инициирующие его воспламенение отсутствуют.

Для сравнения были проведены аналогичные эксперименты в водород-кислородных смесях.

На рис.4 представлены результаты экспериментов по воспламенению стехиометрической водород-кислородной смеси 67% $\text{H}_2 + 33\% \text{O}_2$ в координатах P и T за падающей ударной волной. В отличие от результатов, приведенных на рис.2 здесь предельная кривая воспламенения смеси имеет классический вид (три предела).

Однако граница воспламенения на третьем пределе (область 3 кривой В) полученная в экспериментах на ударной трубе лежит значительно ниже данных Льюиса и Эльбе. Соответственно воспламенение стехиометрической смеси в ПУВ происходит при более низких температурах, нежели у Льюиса и Эльбе при тех же давлениях. Так, температура воспламенения при давлении 1.1 атм. по данным цитируемых авторов составляет 830 К, а в настоящей работе в 730 К. При этом точки пересечения второго и третьего пределов практически совпадают.

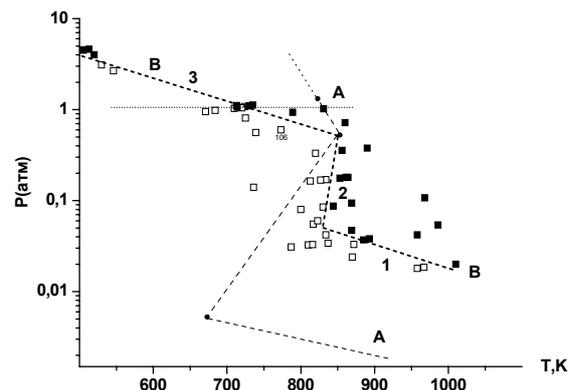


Рис. 4. Температурная зависимость давления воспламенения смеси: 67% $\text{H}_2 + 33\% \text{O}_2$. Кривая А – данные Льюиса и Эльбе, В – результаты полученные в ударной трубе

В области второго предела (давления $0.5 \div 0.05$ атм) воспламенение в УВ происходит при более высоких температурах. Так по данным указанных авторов при давлении 0.09 атм температура воспламенения составляет 780 К, а в настоящей работе 830 К.

В области первого предела давление воспламенения в УТ в 20 раз превышает эту величину у Льюиса, Эльбе. Это различие повидимому связано с недостаточной длиной “пробки” нагретого газа за ударной волной [21]. Так в разбавленной аргоном смеси при парциальном давлении $(2\text{H}_2 + \text{O}_2)$ $P_{\text{парц}} = 0.2$ атм значения τ составляют ~ 10 мс [23].

В реализуемых условиях в ПУВ длина “пробки” в единицах времени составляет ~ 300 мкс. При этом, хотя длина пробки недостаточна, воспламенение все же происходит, возможно, вследствие турбулентного характера потока в контактной области толкающего газа. Кроме того, в этой области давлений резко меняется вид осциллограмм излучения. Длительность из-

лучения сокращается примерно в ~ 10 раз ($30 \div 40$ мкс), хотя длина “пробки” ударно нагретого газа составляет ~ 400 мкс, а область излучения движется практически с газовой скоростью. Указанные особенности воспламенения водородо-воздушных и водород-кислородных смесей в падающей ударной волне требуют дальнейшего изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования воспламенения за падающей ударной волной в ударной трубе. Определены пределы воспламенения этих смесей за фронтом волны в интервале температур $T = 500 \div 1010$ К и давлений $P = 0.02 \div 10.8$ атм.

Зарегистрированы существенно меньшие значения температуры воспламенения этих смесей по сравнению с классическими данными Льюиса, Эльбе и результатами экспериментов, полученными в отраженных ударных волнах.

В случае водородо-воздушных смесей показано отсутствие трех пределов характерных для воспламенения водород-кислородных смесей. Предельная кривая имеет монотонный вид во всей области газодинамических параметров.

Времена индукции воспламенения указанных смесей измеренные в падающей ударной волне значительно ($5-7$ раз) меньше, нежели в отраженных волнах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lewis B., Elbe G. Combustion, flames and explosions of gases. Cambridge, 1938.
- Налбандян А.Б. Кинетика окисления водорода внутри области низкотемпературного воспламенения. // Физ. хим. Т. 19, № 4, 1945, с. 201.
- Кондратьев В.Н. Измерение пределов воспламенения при струйном методе. ДАН СССР Т. 49, № 2, 1945, с. 116.
- Lewis B., Elbe G. von. Combustion Flame and Explosions of Gases. N.Y., Academic Press, 1951.
- Иванова А.Н., Андрианова З.С., Азатян В.В. Применение общего подхода к получению пределов воспламенения в реакции окисления водорода // Хим. физика. 1998, Т. 17, № 8, с. 91.
- Солоухин Р.И., Воеводский В.В. О механизме и пределах цепного самовоспламенения водорода с кислородом в ударных волнах // Доклады Академии наук СССР, 1964, Т. 154, № 6, с. 1425.
- Snyder AD, Robertson J, Zanders DL, Skinner GB (1965) Shock tube studies of fuel-air ignition characteristics. Report AFAPL-TR-65-93.
- Craig RR (1966) A shock tube study of the ignition delay of hydrogen-air mixtures near the second explosion limit. Report AFAPL-TR-66-74.
- Just T, Schmalz F (1968) Measurements of ignition delays of hydrogen-air mixtures under simulated conditions of supersonic combustion chambers. AGARD CP No 34, Part 2, Paper.
- Мартыненко В.В., Пенязьков О.Г., Раготнер К.А., Шабуня С.И. // Высокотемпературное воспламенение водорода и воздуха при повышенных давлениях за отраженной ударной волной. Инж.- физ. журн. 2004, Т. 77, № 4, с. 100.
- Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н., Хомик С.В., Бартнев А.М. // Основные режимы самовоспламенения и условия их реализации в горючих газовых смесях. Физика горения и взрыва, 1997, Т. 33, № 2, с. 3.
- Павлов В.А., Шаталов О.П. Измерение времени индукции воспламенения водород-кислородных смесей за фронтом падающей ударной волны. // Кинетика и Катализ. 2011, том 52, № 2, с. 163–172.
- Великодный В.Ю. О влиянии движения газа на кинетику физико-химических превращений // ЖТФ. 1989, Т. 59, вып. 12, С. 126–129.
- Козлов П.В., Лосев С.А., Романенко Ю.В. Поступательная неравновесность во фронте ударной волны в смеси аргона и гелия // Письма в ЖТФ, 2000, Т. 26, вып. 22, С. 69–739.
- Топчийн М.Е. К энергетическим соотношениям в ударных и детонационных волнах. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2005. Том 3. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2005-11-21-001.pdf>
- Сазонов А.Ю., Шуть Н.В. Численное исследование поступательной неравновесности за фронтом ударной волны. // Журнал технической физики, 2005, Т. 74, вып. 6, с. 20.
- Диваков О.Г., Еремин А.В., Зиборов В.С., Фортвов В.Е. Неравновесное воспламенение кислородо-водородных смесей во фронте слабой ударной волны. // Доклады Академии Наук, 2000, Т. 373, № 4, С. 487–490.
- Козлов П.В., Лосев С.А., Романенко Ю.В. Измерение времени индукции реакции H_2+O_2 инициированной ударной волной в стехиометрической смеси // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т. 12, <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2011-09-01-002.pdf>
- Попов Н.А. Влияние неравновесного возбуждения на воспламенение водород-кислородных смесей. Теплофизика высоких температур, 2007, Т. 45, № 2, С. 296–315.
- Martin W.A., An axperimental study of the boundary layer behind a movingplane shock wave. UTIA, Report, № 47, May, 1957.
- Griem H.R., Kolb A.C., Shen K.Y., Phys.Rev, 116, № 1, 4, 1960.
- Павлов В.А. Некоторые особенности измерения и интерпретации времени индукции воспламенения водородо-кислородных смесей за фронтом ударной волны // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2009. Том 8. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2009-03-12-002.pdf>
- Pang G.A., Davidson D.F., Hanson R.K. Experimental study and modeling of shock tube ignition delay times for hydrogen-oxygen-argon mixtures at low temperatures // Proceedings of the Combustion Institute 32 (2009) 181–188.