Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

50X1-HUM

капли даны в статье Я. И. Френкеля [2], посвященной анализу явлений смачивания капель с наклонной поверхности.

В тех случаях, когда твердая поверхность содержала гидрофобные участки (стекло — парафин), последить каплю так, чтобы она частично лежала на гидрофильном участке (стекло), а частично — на гидрофобном (парафин), вообще невозможно. Даже если в момент нанесения воды пластинку наклонить к парафину и наносить каплю почти целиком на

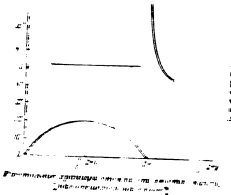


Рис. 2. Капля воды на неоднородной твердой поверхности на границе раздела фаз стекло — стекло. Зависимость краевого угла смачивания от длины периметра капли относительно границы раздела фаз стекло — стекло (капля в стекле)

Граничные условия [illegible]

парафин, капля самопроизвольно перемещается вверх — против силы тяжести и растекается на стекле. Эта последняя представляет собой границы раздела двух твердых фаз. Эти последние представляют собой большое препятствие, что свидетельствует о [illegible] для капель весьма больших размеров. [illegible] Френкелю за ценные [illegible] и интересные [illegible] к данной работе.

Выводы

1. Для капель воды на поверхности стекла на частично гидрофильной поверхности (стекло — парафин) [illegible] зависимость краевых углов смачивания от периметра жидкости [illegible] и критических углов скатывания от длины периметра капли относительно границы стекло/стекло.

2. Показано, что как величины краевых углов смачивания, так и критических углов скатывания зависят от длины периметра капли относительно границы стекло/стекло. Причем величина Δ° полным определяется по [illegible] капли, что находит теоретическое объяснение.

3. На поверхности, состоящей из стекла и парафина, пребывание капли в приложении на гидрофильном и гидрофобном участках невозможно. Граница парафина представляет препятствие для скатывания капли на стекло.

Поступила
9 IV 1949

Литература

1. Я. Б. Арон и Я. И. Френкель, Журн. физ. хим. 23, 9, 407 1949.
2. Я. И. Френкель, Журн. физ. хим. [illegible]

АДИАБАТИЧЕСКОЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЕ БЫСТРОГОРЯЩИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Я. Т. Гершаник, Я. Б. Зельдович и А. П. Розловский

Хорошо известен ряд преимуществ адиабатического сжатия, как способа изучения воспламенения газовых взрывчатых смесей.

Адиабатическое воспламенение представляет также большой интерес в связи с теорией детонации газов, механизм которой заключается в самовоспламенении смеси, сжатой достаточно мощной ударной волной. Весьма существенны его условия для ряда проблем работы двигателей внутреннего сгорания, в частности изучения «стука» в моторах, по мнению многих исследователей тесно связанного с адиабатическим самовоспламенением, хотя эта связь количественно еще не вполне выяснена.

Для нас вопрос о возможности быстрого самовоспламенения при сжатии до невысокого давления представлял особый интерес в связи с нашей предыдущей работой [1] о переходе нормального горения в детонацию при сферическом распространении пламени в смесях грючего газа с добавками сероуглерода. Наблюденное нами возникновение детонации было объяснено автотурбулизацией пламени, предсказанной Л. Д. Ландау [2]. Между тем Х. А. Рахимова, Н. К. Трошин и К. И. Щелкин [3], обнаружив переход сферического пламени в детонацию в смесях C_2H_2 и O_2, в качестве одного из возможных объяснений возникновения сферической детонации предлагают механизм адиабатического воспламенения смеси, сжатой ударной волной перед фронтом нормального пламени. Расчеты показывают, что при наблюдавшихся больших скоростях пламени температура смеси может достигать 800—900° С. Исследованные нами смеси содержали добавки сероуглерода, характерной особенностью которого является весьма низкая минимальная температура самовоспламенения [4]; имеются указания, что она может быть ниже 110° С. При этом, однако, период индукции должен быть не более 10^{-3} сек., что маловероятно. Измерение минимальных температур адиабатического воспламенения и соответствующих им периодов индукции для исследованных смесей дает возможность непосредственной экспериментальной проверки такого объяснения.

Для решения поставленной задачи мы осуществили установку, в которой смесь, находящаяся при начальном давлении ниже атмосферного, подвергается адиабатическому сжатию воздухом, втекающим в сосуд при соединении его с атмосферой. По сравнению с обычным способом адиабатического сжатия движущимся поршнем наша установка отличается простотой изготовления и малым временем сжатия, которое лишь с трудом может быть достигнуто поршнем. Основной недостаток нашей установки по сравнению с обычной — фиксированное, равное 1 *ата* конечное давление. Температуру в конце сжатия можно изменять путем предварительного подогрева смеси. Второй важный недостаток — возможность временного превышения давления над конечным за счет инерции воздуха — подробно рассмотрен ниже.

В принципе, усложняя установку, можно сжимать исследуемую взрывчатую смесь газом при повышенном начальном давлении. Нам удалось исследовать самовоспламенение при времени нагревания около $5 \cdot 10^{-3}$ сек. Регистрируя более детально движение газа и воздуха (ниже описан простой метод такой регистрации) на установке, подобной нашей, можно бу-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

50X1-HUM

капли даже в статье Я. И. Френкеля [2], посвященной анализу явлений скатывания капель с наклонной поверхности.

В тех опытах, когда твердая поверхность содержала гидрофобные участки (стекло — парафин). Посадить каплю так, чтобы она частично лежала на гидрофильном участке (стекло), а частично — на гидрофобном (парафин), вообще невозможно. Даже если в момент нанесения воды пластинку наклонить к парафину и нанести каплю почти целиком на

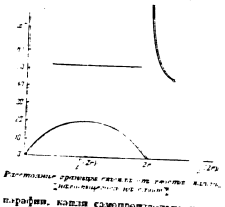


Рис. 2. Капля воды на неоднородной твердой поверхности на границе раздела фаз стекло — смесь. Зависимость критического угла скатывания от асимметрии положения капли относительно границы раздела фаз (стекло — стекло (вверху и стекло)

Расстояние границы раздела фаз (вертикальная ось) (вверху — парафин, внизу — стекло)

парафин, капля самопроизвольно перетекает вверх — против силы тяжести и располагается целиком на стекле у границы раздела двух твердых фаз. Это последнее представляет столь большое препятствие, что скатывание оказывается невозможным для капель весьма больших размеров.

Выражаю благодарность чл.-корр. АН СССР Я. И. Френкелю за внимание к работе и интерес, проявленный к данной работе.

Выводы

1. Для капель воды постоянного веса на поверхности гидрофильной поверхности (стекло — стекло) исследовалась зависимость критических углов смачивания (на обеих частях поверхности) и критических углов скатывания от расположения жидкости относительно границы стекло-стекло.

2. Показано, что как величины критических углов смачивания, так и критического угла скатывания зависят от асимметрии капли относительно границы стекло-стекло. Причем величина эт асимметрии определяется положением краев капли, что позволяет теоретически определить поверхностное натяжение.

3. На поверхности, составленной из стекла и парафина, превращение жидкости одновременно на гидрофильном и гидрофобном участках невозможно. Граница парафин представляет препятствие для скатывания капель со стекла.

Поступила
9 IV. 1949

Литература

1. Я. Б. Арон и Я. И. Френкель, ЖЭТФ, 19, 9, 497, 1949.
2. Я. И. Френкель, ЖЭТФ, 19, 7, 809, 1949.

1950 ЖУРНАЛ ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ т. XXIV, вып. 1

АДИАБАТИЧЕСКОЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЕ БЫСТРОГОРЯЩИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Я. Т. Гершаник, Я. Б. Зельдович и А. П. Розловский

Хорошо известен ряд преимуществ адиабатического сжатия, как способа изучения воспламенения газовых взрывчатых смесей.

Адиабатическое воспламенение представляет также большой интерес в связи с теорией детонации газов, механизм которой заключается в самовоспламенении смеси, сжатой достаточно мощной ударной волной. Весьма существенны его условия для ряда проблем работы двигателей внутреннего сгорания, в частности изучения «стуков» в моторах, по мнению многих исследователей тесно связанных с адиабатическим самовоспламенением, хотя эта связь количественно еще не вполне выяснена.

Для нас вопрос о возможности быстрого самовоспламенения при сжатии до начального давления представлял особый интерес в связи с нашей предыдущей работой [1] о переходе нормального горения в детонацию при сферическом распространении пламени в смесях преимущественно с добавками сероуглерода. Наблюденные нами возникновение детонации было объяснено автоурбулизацией пламени, предсказанной Л. Д. Ландау [2]. Между тем Х. А. Рахмилевич, Я. К. Трошин и К. И. Щелкин [3], обнаружили переход сферического пламени в детонацию в смесях C_2H_2 и O_2, в качестве одного из возможных объяснений возникновения сферической детонации предлагают механизм адиабатического воспламенения смеси, сжатой ударной волной перед фронтом нормального пламени. Расчеты показывают, что при наблюдавшихся больших скоростях движения температура смеси может достигать 800—900° С. Исследованные нами смеси содержали добавки сероуглерода, характерной особенностью которого является весьма низкая минимальная температура самовоспламенения [4]: имеются указания, что она может быть ниже 150° С. При этом, однако, индукционный период должен быть не более 10⁻⁴ сек., что маловероятно. Наоборот, минимальная температура адиабатического воспламенения и соответствующие им периоды индукции для исследованных смесей дает возможность нашего экспериментальной проверки такого объяснения.

Для решения поставленной задачи мы осуществили установку, в которой смесь, находящаяся при начальном давлении ниже атмосферного, подвергается адиабатическому сжатию поршнем, изготовленным в форме при соединении его с атмосферой. По сравнению с обычным способом адиабатического сжатия поршнем лишь установка отличается простотой изготовления и малым временем сжатия, которое лишь с трудом может быть достигнуто поршнем. Основной недостаток новой установки по сравнению с обычной — фиксированное, равное 1 атм начальное давление. Температуру в конце сжатия можно изменять путем предварительного подогрева смеси. Второй важный недостаток — возможность преждевременного воспламенения давлением над поршнем на счет нагрева воздуха — подробно рассмотрен ниже.

В принципе, усложнив установку, можно снизить последнюю вплоть до смесь газов при повышенном начальном давлении. Нам удалось исследовать самовоспламенение при времени нагревания около 5-10⁻⁴ сек. Регистрируя более детально движение газа и воздуха (более простой метод такой регистрации) на установке, подобной нашей, можно бу-

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

[illegible] ударной волне, сжимающей [illegible] выравнивания давления). Давлен минимальный [illegible] $\Delta p \approx 2 \cdot 10^{-4}$ атм.

Методика исследования

[illegible] трубка [illegible] трубку 1, [illegible] через отверстие с [illegible] трубки до отростка объемом [illegible] внутрь [illegible] получить предварительный подогрев смеси. Начальная температура в трубке определяется по показанию манометра 3 на основании предварительной калибровки. Трубка может открываться быстрым выдергиванием пробки при помощи сильной пружины [illegible] Нижний конец пружины удерживается в исходном положении стопором 7. При быстром выдергивании пробки атмосферный воздух вносится в трубку и скоростью пружины скорость [illegible] смеси.

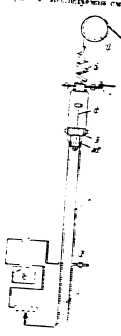


Рис. 1. Схема установки для изучения адиабатического воспламенения

Максимальная скорость открывания трубки достигается применением следующего приспособления. Через пробку 2 [illegible] в трубку на 7 см [illegible] для герметичности [illegible] рабочая длина пружины равна [illegible] пружины. Вдоль [illegible] пружины [illegible] стопором. При сжатии пружины [illegible] с металлом груз [illegible] скоростью пружины [illegible] скорости [illegible] пружины [illegible] пружины [illegible] пружины [illegible] освобождается [illegible] открывания трубки.

Скорость в момент начала при открывании трубки [illegible] ударных волн [illegible] воздуха, проходящие [illegible] давления [illegible] температуры. Давление [illegible] трубки [illegible] давлению [illegible] Δp [illegible] Δp [illegible] Δp

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

20 см. В них на пробках, обеспечивающих герметичность, вводились электроды с надетыми на концах манганиновыми нитями диаметром 0,01 мм (рис. 3). Последовательное соединение нитей между собой обеспечивало одновременность их пережигания. Металлический контакт, движущийся вместе с закрывающей трубку пробкой, замыкал заряженный конденсатор (1 μF при 7 kV) через нити в момент открывания трубки. Типичные фотографии пережигания нитей в воздушном потоке даны на рис. 4, на котором указаны скорости воздушного потока в разных точках трубки. Из этих опытов следует, что время натекания воздуха после выдергивания пробки имеет порядок $5 \cdot 10^{-3}$ сек.

Интересна фотография рис. 4 *b*, на которой зафиксировано движение воздуха в противоположных направлениях в разных точках трубки из-за происшедшего одновременно с втеканием воздуха воспламенения смеси в нижней части трубки, а также может перемены знака скорости воздушного потока.

Интересны также фотографии рис. 5. В этих опытах перечигание нитей произошло до перемещения смеси в нижнюю часть трубки и вызвало воспламенение движущейся смеси. Свечение металлического пара в нагретых продуктах реакции много интенсивнее и длительнее, чем в холодном воздухе. Подобная методика может оказаться полезной при изучении разнообразных быстрых газодинамических процессов.

Фотографирование распространения пламени в сочетании с определением скорости натекания воздуха позволило нам оценить величину периода индукции. С другой стороны, максимальная возможная в условиях нашего опыта величина периода индукции может быть вычислена из анализа условий охлаждения смеси, нагретой в трубке адиабатическим сжатием. Приближенный расчет для смеси $2H_2 + O_2$ в предположении теплового механизма взрыва (см. О. М. Тодес [5]), механизма охлаждения чистой теплопроводностью, без конвекции (см. Д. А. Франк-Каменецкий, [6]) и эффективной энергии активации от 100 000 до 300 000 кал/моль [7] дает максимальный возможный период индукции $5 - 7 \cdot 10^{-3}$ сек. Поскольку величина периода индукции экспоненциально зависит от температуры, уже при T_0 близком к критическому, период индукции становится меньше времени открывания трубки и натекания воздуха. Поэтому период индукции может быть измерен только вблизи предела воспламенения. Опыт показывает, что измеренное по фотографии время от начала движения пробки до воспламенения не зависит от температуры до близких к критическим условиям и лишь вблизи предела возрастает до $1 - 2 \cdot 10^{-2}$ сек. Отсюда наблюденная величина периода индукции весьма грубо может быть оценена в $5 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$ сек.

Определение критических условий воспламенения

Нами изучалось воспламенение следующих смесей:

I. $2H_2 + O_2$; II. $CS_2 + 4O_2$; III. $59{,}2\%\ H_2 + 38{,}8\%\ O_2 + 2{,}0\%\ CS_2$; IV. $C_2H_2 + O_2$.

Результаты опытов со смесью I приведены на рис. 6 в координатах $-\lg \frac{p_0}{p_a} - \lg T_0$, в которых адиабаты Пуассона изображаются семейством параллельных прямых с угловым коэффициентом, равным $\frac{1-\gamma}{\gamma}$. Расположение точек *, отвечающих предельным значениям $p_0 - T_0$, на одной

* Здесь, как и в дальнейших рисунках, большинство точек, в особенности близких к пределу, отражают результаты нескольких аналогичных опытов.

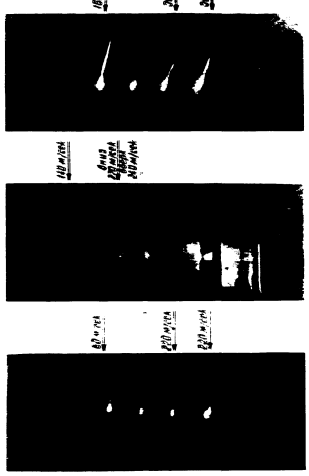
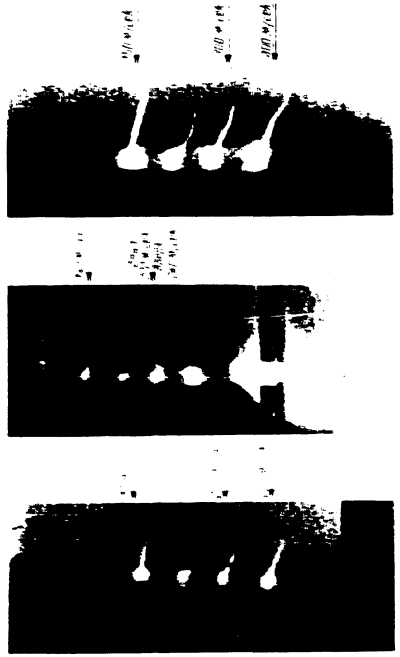


Рис. 4. Пережигание нитей в воздушном потоке

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1



Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

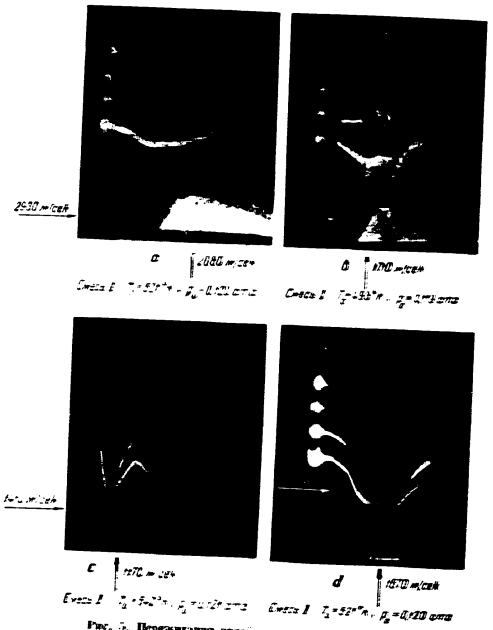


Рис. 5. Перемешивание потоков в движущейся горючей смеси

из таких прямых будет подтверждением предполагаемого воспламенения, а точка пересечения этой прямой с осью абсцисс $\left(\frac{p_0}{p_n}=1\right)$ определяет минимальную температуру адиабатического нагрева, достаточную для воспламенения смеси в этих условиях — $T_в$.

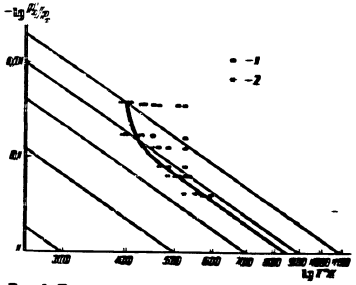


Рис. 6. Пределы воспламенения смеси $2H_2 + O_2$. 1 — нижний предел, 2 — верх. предел воспламенения

Как видно из рис. 6, кривая, отделяющая области возникновения и отсутствия воспламенения, при больших начальных давлениях идет параллельно семейству адиабат, но при понижении начального давления отклоняется вверх, т. е. минимальная температура, необходимая для воспламенения, заметно возрастает. Такое отклонение понятно, если учесть что при малых начальных давлениях конечная высота столба смесей (смеси оказывается сравнимой с диаметром трубки. При этом становится, что при сжатии начинает играть заметную роль перемешивание с воздухом. Минимальная температура самовоспламенения оказывается равной 850° К.

Интересно сопоставить результат наших измерений с данными других авторов, изучавших адиабатическое воспламенение при больших давлениях (табл. 1).

Таблица 1

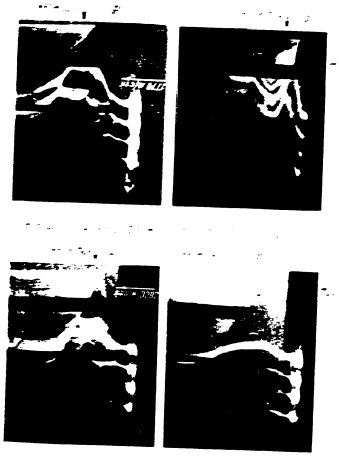
Критические условия адиабатического воспламенения смеси $2H_2 + O_2$

p_0 ата	T_0 °К	p_n ата	$T_в$ °К	Диаметр сосуда см	Автор
>1	293	—	815	2,6	Фальк[7]
1,25	288	20	785	4,4	Кистяк[7]
1	293	34,2	790	3,0	Дикон и Крафт[11]
0,5	294,7	18,1	822	3,0	» » »
—	323	—	800	3,0	» » »
Различно от 0,126 до 0,264	от 486 до 530	1	850	2,1	Наши данные (область воспламенения $T_в$)

Сравнение показывает, что значительное изменение начального давления не влияет существенно минимальной температуры воспламенения.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1



Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

Целесообразно подчеркнуть, что минимальная температура адиабатического воспламенения является по существу физико-химической константой смеси, так как ее зависимость от условий опыта слаба *.

Выше указывалось, что в процессе сжатия смеси впускающим в трубку воздухом давление может на короткое время превысить атмосферное. Расчеты показывают, что при мгновенном сжатии атмосферным воздухом максимальное давление может достигать 2,5—3,5 атмосферного, причем величина его возрастет с уменьшением начального давления смеси. Казалось, это может существенно искажать результаты. Опыт показывает несостоятельность такого опасения.

Как было указано, пределы воспламенения смеси I при разных начальных давлениях вполне соответствуют адиабатическому сжатию до атмосферного давления, при малых начальных давлениях минимальная температура воспламенения возрастает. Между тем, если бы воспламенение определялось температурой кратковременного избыточного сжатия, критическая температура должна была бы резко снижаться с уменьшением начального давления.

Опыт показывает далее, что период индукции на пределе воспламенения безусловно превосходит 10^{-2} сек. Уменьшение периода индукции при повышении температуры сжатия ограничено временем нагревания воздуха в трубку, изменяющим порядок $5 \cdot 10^{-3}$ сек. Если бы предел воспламенения определялся температурой «пересжатия», период индукции являлось выше, нагревание воздуха начинается раньше полного открывания трубки, а это, повидимому, приводит к более плавному выравниванию давления и уменьшению «пересжатия».

Поскольку условия адиабатического воспламенения не должны зависеть от состояния поверхности реакционного сосуда, нами были изучены пределы воспламенения в трубке со стенками, отрасленными обработкой раствором KCl. Такая обработка сильно понижает скорость реакции грелучей смеси в нагретом сосуде [7]. Результаты опытов, приведенные на рис. 7, на котором для сравнения нанесена кривая предельных условий воспламенения в чистой трубке, показывают, что состояние стенок не влияет на критические условия адиабатического воспламенения. Аналогичные результаты были получены для смеси II (рис. 8). Известно, что, если конец трубки имеет не круглую, а коническую форму, давление и температура в отраженной волне заметно возрастают. Сравнимы условия воспламенения в трубках с круглым и коническим концами, можно дополнительно проверить, определяются ли условия воспламенения начальными стадиями процесса или реакцией при конечном установившемся давлении, равном 1 ата. Результаты изучения воспламенения в трубке с коническим концом (высота конуса около 10 см) приведены на рис. 7. Они показывают, что критические условия воспламенения остаются неизменными в пределах точности эксперимента.

На рис. 7 приведены также некоторые результаты изучения смеси 59,2% H_2 + 38,8% O_2 + 2,0% CS_2; для сходной смеси нам ранее [1] на-

* Легко показать, что при тепловом механизме воспламенения разность критических температур $\Delta T_{кр}$ в сосудах с радиусами r_1 и r_2 в первом приближении определяется выражением:

$$\Delta T_{кр} = \vartheta \ln \frac{r_1}{r_2},$$

где ϑ — характеристический интервал температур. При различных конечных давлениях p_1 и p_2 в том же приближении

$$\Delta T_{кр} = \nu \vartheta \ln \frac{p_1}{p_2},$$

где ν — порядок реакции.

блюдали возникновение сферической детонации. Отношение теплоемкостей у этой смеси меньше, чем у смеси $2H_2 + O_2$. На рис. 7 соответствующие адиабаты показаны пунктирными линиями. Как видно

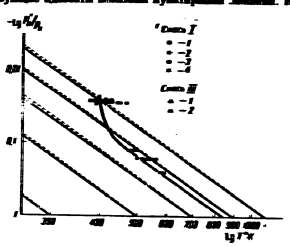


Рис. 7. Пределы воспламенения смеси $2H_2 + O_2$ = 59,2% H + +38,8% O_2 + 2,0% CS_2 в различных условиях

I, 2 — отверстие трубки покрыто KCl, воспламенение, 3 — отверстие трубки покрыто KCl, нет воспламенения, 4 — отверстие открыто, воспламенение, 5 — трубка с коническим концом, воспламенение, 6 — трубка с коническим концом, нет воспламенения. III, 1 — воспламенение, 2 — нет воспламенения.

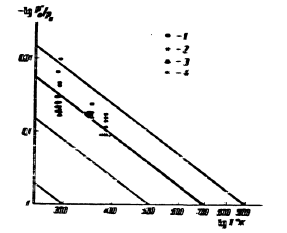


Рис. 8. Пределы воспламенения смеси $CS_2 + 4O_2$

1 — воспламенение, 2 — нет воспламенения, 3 — отверстие трубки II покрыто KCl, воспламенение, 4 — отверстие трубки покрыто KCl, нет воспламенения

из графика, условия воспламенения этой смеси мало отличаются от смеси $2H_2 + O_2$, минимальная температура воспламенения порядка 880° K. Для того чтобы такой разогрев мог получиться при сжатии смеси перед

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

фронтом пламени в условиях наших предыдущих опытов по возникновению сферической детонации, потребовалось бы распространению пламени со скоростью 1350 м/сек. Таким образом, упомянутое выше предположение Х. А. Ракиповой, Я. К. Трошина и К. И. Щелкина об одной из возможных причин возникновения сферической детонации не находит подтверждения при непосредственной экспериментальной проверке*.

Точное изучение граничных условий адиабатического воспламенения смеси $C_2H_2 + O_2$, для которой этими авторами было обнаружено возникновение сферической детонации при атмосферном давлении, оказалось затруднительным, так как ее воспламенение неизменно приводит к разрушению реакционной трубки. Результаты некоторых опытов, позволяющих приближенно оценить минимальную температуру воспламенения, приведены в табл. 2.

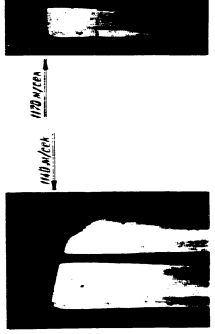
Таблица 2

Адиабатические воспламенения смеси $C_2H_2 + O_2$

P_0 ата	0,0090	0,0096	0,025	0,058	0,627	0,122	0,123
T_0 °K	345	345	291	446	425	449	451
T_c °K	1040	1040	640	885	1004	745	796
Возникновение воспламенения	нет	есть	нет	есть	есть	нет	есть

Учитывая искривление границы области воспламенения при малых начальных давлениях (<0,07 ата), можно считать, что при атмосферном давлении минимальная температура адиабатического воспламенения этой смеси — порядка 750° К, что безусловно исключает возможность воспламенения при нагреве ударной волной перед фронтом нормального пламени**.

Как известно, изучение самовоспламенения смесей CS_2 с O_2 в нагретых сосудах затруднительно ввиду сильной невоспроизводимости результатов, в особенности из-за неопределенности состояния стенок реакционного сосуда [11]. Рис. 8 иллюстрирует результаты изучения адиабатического воспламенения смеси $CS_2 + 4O_2$. Отметим, что при начальных давлениях до 36 мм эта смесь воспламенялась без предварительного подогрева при начальной температуре, равной комнатной. Ее минимальная температура воспламенения 650—700° К. Таким образом, низкие температуры самовоспламенения смесей сероуглерода в нагретых сосудах связаны, по-видимому, с большим периодом индукции. Возможно также прямое действие твердой стенки на самовоспламенение. В связи с этим любопытно отметить, что по данным Томпсона [12], изучавшего методом скрещенных струй Габера и Алва воспламенение смесей сероуглерода с кислородом при



Смесь I $T_0 = 332°$ К, $P_0 = 0{,}120$ ата

Смесь III $T_0 = 341°$ К, $P_0 = 0{,}123$ ата

Рис. 8

* Следует отметить, что сферическая детонация, вообще говоря, является следствием адиабатического воспламенения перед фронтом пламени первичной смеси, сжатой ударной волной, постольку, поскольку это — общепризнанное объяснение природы детонации. Однако, в отличие от объяснения К. И. Щелкина и сотрудников, такое самовоспламенение имеет место не при слабом нагреве до 80—100° С впереди нормального фронта пламени, а лишь после ускорения пламени, т. е. перед турбулизованным фронтом, движение которого нагревает смесь до 500—600° С, так что оно является следствием, а не причиной ускорения пламени.

** Давление, при котором в обеих упомянутых работах наблюдалось возникновение сферической детонации, больше атмосферного (в работе К. И. Щелкина и сотрудников $P_0 = 2$ ата из-за роста давления в ударной волне). Однако предел по давлению P_0 может столь существенно изменить температуру воспламенения.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

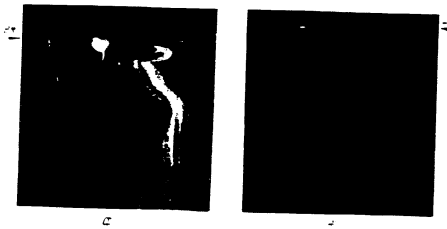


Рис. 10

атмосферного давления, в отсутствие твердой поверхности трудно добиться воспламенения при температуре ниже 290° С. Внесение стеклянной трубки в место перетечения струй понижало температуру воспламенения до 900° С.

Адиабатическое воспламенение смесей CS_2 с воздухом изучали также Тизар и Пай [13] при начальном давлении 1 ата. Воспламенение достигалось при 9—11 ата и минимальной $T_0 = 327°$ К. Можно считать, что этот результат в известной мере согласуется с нашим, если учесть различие давлений и тепловые потери в опытах Тизара и Пая, приводящие к систематически завышенным T_0 в их опытах.

Воспламенение смеси $CS_2 + 4O_2$ изучено нами в сравнительно узком интервале начальных давлений. Меньшие давления потребовали бы охлаждения всей трубки до температуры ниже комнатной, большие — начальной температуры свыше 125° С, при которой мы наблюдали появление холодного пламени, перемещающего через некоторое время в тепловой взрыв до открывания трубки. Любопытно, что смесь 59,2% H_2 + 38,8% O_2 + + 2,0% CS_2 не давала холодного пламени до 220° С, а понижающие (до наблюдавшихся пределов) при больших температурах в внутренней части трубки холодное пламя, периодически вспыхивавшее и потухшее, не приводило к самовоспламенению смеси, которая нормально воспламенялась после открывания трубки.

Распространение пламени по адиабатически сжатой смеси

Изучение распространения пламени при адиабатическом воспламенении представляет интерес для выяснения роли эмиссионного пламени. Фотографирование распространения пламени в смесях $2H_2 + O_2$ и 59,2% H_2 + 38,8% O_2 + 2,0% CS_2 показало, что положение точки воспламенения не остается постоянным, однако большей частью смесь воспламенялась у дна трубки. Типичные фотографии распространения пламени приведены на рис. 9. Как видно из фотографии, воспламенение не происходит одновременно по всем точкам внутренней смеси. Напротив, появившись в одной точке трубки, пламя распространяется далее так, как обычно имеет место при поджигании холодной смеси. Аналогичную картину распространения пламени и неопределенность расположения точки воспламенения наблюдали Дикстон с сотрудниками [14]. В некоторых наших опытах смесь воспламенялась почти одновременно в двух точках (рис. 9 *б*).

Во многих опытах были зарегистрированы скорости распространения пламени, значительно большие нормальной скорости (~ 5000 см/сек) и даже близкие к детонационным. При этом, как правило, наблюдался значительный участок распространения с постоянной скоростью. Типичные фотографии такого быстрого распространения даны на рис. 10.

Наблюденная нами картина распространения пламени вполне аналогична картине, которую еще ранее наблюдали А. Н. Воинов [15] в бензиновоздушных смесях при самовоспламенении и детонации последней части заряда в цилиндре экспериментального двигателя. А. Н. Воинов и А. С. Соколик [15] особенно подчеркивают значение больших скоростей пламени при самовоспламенении в двигателе, так как именно при быстром горении возникают ударные волны. В наших опытах большие скорости достигались или сразу в месте воспламенения или после прохождения небольшого участка расстояния порядка 1—2 диаметров трубы (рис. 10 *д*, 9 *б*). Для объяснения столь быстрого распространения А. С. Соколик и К. И. Щелкин [16, 17] привлекают химическую подготовку, т. е. то обстоятельство, что вся смесь одновременно нагревается и по окончании периода индукции в одном каком-то (первом) элементе объема смесь воспламеняется и быстро к концу периода индукции и близка к воспламенению во всем остальном объеме. Одновременно воспламенение смеси в двух точках находится в согласии с такими объяснениями.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1

В связи с этим предположением мы сфотографировали распространение пламени по смеси, нагретой адиабатическим сжатием до температуры ниже критической при поджигании ее искрой через $1 \div 3 \cdot 10^{-3}$ сек. после начала выдерживания пробы, т. е. приблизительно в момент максимального нагрева. При поджигании смеси слабой искрой от конденсатора емкостью в 0,01 μF пламя распространялось со скоростью 500 м/сек. Мощная искра от конденсатора в 1 μF, приводящая к образованию достаточно сильной ударной волны, вызывала распространение детонации.

Любопытно отметить, что при помещении в нижней части трубки металлической проволоки воспламенение смеси в пределах ошибок опыта происходит возле нее.

Интересны детали фотографий (5 *b*, *c*, *d*) воспламенения смеси в потоке, из которых зафиксировано быстрое ускорение пламени с переходом к детонации. На этих фотографиях видны также следы ударных волн в смеси и отражение их от границы раздела с воздухом.

В наших, весьма предварительных опытах по этому вопросу остается неясной роль движения смеси по трубке в создании большей скорости горения * и, с другой стороны, неясны количественно условия перехода такого горения в детонацию. При оценке результатов следует иметь в виду, что и в холодных смесях в процессе возникновения детонации или при временном разрушении детонационной волны также наблюдаются высокие скорости пламени.

Выражаем благодарность Н. Н. Шилинскому за ряд ценных замечаний.

Выводы

1. Разработана новая методика адиабатического воспламенения смеси при малых давлениях.

2. Изучены критические условия адиабатического воспламенения смеси $2H_2 + O_2$ и $CS_2 + 5O_2$ при атмосферном давлении.

3. Расчет состояния смеси, сжатой ударной волной, и изучение условий воспламенения показывают, что нагрев смеси перед воспламенением может считаться адиабатическим при сжатии до атмосферного давления. При не слишком малых начальных давлениях смесь сжимается послойно, не смешиваясь с втекающим воздухом.

4. Изучено влияние обработки сосуда хлористым калием на критические условия воспламенения. В пределах ошибки опыта состояние стенок сосуда не влияет на пределы воспламенения.

5. Дана экспериментальная оценка температур адиабатического воспламенения смесей 59,2% H_2 + 38,8% O_2 + 2,0% CS_2 и $C_2H_2 + O_2$. Установлена невозможность адиабатического воспламенения этих смесей перед фронтом пламени при возникновении сферической детонации.

6. Для оценки применимости методики измерены времена открывания трубки и вытекания воздуха, не превышающие каждое $5 \cdot 10^{-3}$ сек. Величина периода индукции смеси $2H_2 + O_2$ вблизи предела воспламенения может быть грубо оценена по фотографии пламени в $1 \cdot 10^{-2}$ сек. Дана новая методика измерения скорости воздушного потока.

7. Получены фотографии распространения пламени в адиабатически сжатых смесях $2H_2 + O_2$ и 59,2% H_2 + 38,8% O_2 + 2,0% CS_2. В подтверждение данных А. Н. Воинова по углеводородо-воздушным смесям наблюдены своеобразные условия распространения пламени со скоростью, близкой к детонационной.

Академия Наук СССР
Институт химической физики
Москва

Поступила
30.IV.1949

* Ср. теории возникновения детонации К. И. Щелкина [18], а также статью Я. Б. Зельдовича [19].

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович и А. Н. Розловский, ДАН, 57, 365, 1947.
2. Л. Д. Ландау, ЖЭТФ, 16, 240, 1944.
3. Х. А. Ракинова, Я. К. Трешин и К. И. Щелкин, ЖТФ, 17, 1397, 1947.
4. Н. Н. Семенов, Цепные реакции, 1934.
5. О. М. Тодес, Журн. физ. хим., 13, 808, 1939; 13, 1294, 1939; 14, 1026, 1940; 16, 1647, 1942.
6. Д. А. Франк-Каменецкий, Диффузия и теплопередача в химической кинетике, 1947.
7. В. В. Воеводский, Журн. физ. хим., 20, 1294, 1946.
8. K. G. Falk, Ann. Phys., 24, 455, 1907.
9. H. Cassel, Ann. Phys., 84, 665, 1926.
10. H. B. Dixon a. I. M. Crofts, J. Chem. Soc., 105, 3096, 1914.
11. В. Г. Воронков и Н. Н. Семенов, Журн. физ. хим., 13, 1095, 1939.
12. H. W. Thompson, Z. phys. Chem., 98, 273, 1930.
13. H. T. Tizard a. D. H. Pye, Phil. Mag., 44 (6), 79, 1922; 1 (7), 1894, 1926.
14. H. B. Dixon, L. Bradshow a. C. Campbell, J. Chem. Soc., 105, 2027, 1914.
15. А. С. Соколик и А. Н. Воинов, Доклады на учредительном совещании ИХФ. 1945 и 1949 гг.
16. А. С. Соколик и К. И. Щелкин, Журн. физ. хим., 5, 1959, 1934.
17. А. С. Соколик и С. А. Житовский, Журн. физ. хим., 20, 13, 1946.
18. К. И. Щелкин, ДАН, 28, 630, 1938; ЖЭТФ, 36, 625, 1946; Журн. физ. хим., 19, 221, 1945.
19. Я. Б. Зельдович, ЖТФ, 17, 3, 1947.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2012/05/21 : CIA-RDP82-00039R000100070030-1