

УДК 534/541

Особенности переходных режимов сгорания углеводородов в замкнутых объемах и в открытых облаках*

Э. Э. Лин, З. В. Танаков

Представляются сводка и краткий анализ результатов экспериментального моделирования процессов сгорания углеводородных газовых смесей в энергетических установках и в открытом приповерхностном пространстве. Режимы горения в замкнутых объемах рассматриваются на примере ацетиленовых смесей в закрытых трубах. Горение открытых облаков в режиме их столкновений рассматривается на примере пропан-бутана, диспергируемого в атмосферу из нескольких сравнительно близко расположенных резервуаров со сжиженным газом.

Введение

Постоянный интерес к исследованиям режимов сгорания газовых смесей на основе углеводородов в замкнутых и открытых энергетических системах связан, в первую очередь, с вопросами безопасности их применения при решении научных и прикладных задач [1–9]. Определенного внимания требует изучение процессов перехода горения газов в детонацию как наиболее опасных с точки зрения разрушительных воздействий на объекты окружающей среды.

Приводится сводка и краткий анализ полученных во ВНИИЭФ результатов экспериментального изучения процессов горения в закрытых трубах с газовыми смесями на основе ацетилена и в сталкивающихся открытых топливно-воздушных облаках (ТВО) на основе пропан-бутана. Выбор горючего компонента в опытах [10–12] с закрытыми трубами связан с разработкой газодинамических лазеров (ГДЛ) на продуктах сгорания ацетилена [13]. Возрастающее же внимание к пропану связано с большим количеством аварий в промышленности и на транспорте, связанных с образованием пропановоздушных смесей. При разгерметизации нескольких сравнительно близко расположенных резервуаров со сжиженным топливом может происходить взаимодействие встречных потоков пара и жидких капель, приводящее к изменению режима сгорания образующейся топливно-воздушной смеси по сравнению с горением одиночных огненных шаров (ОШ). В свете этого возникает необходимость проведения модельных исследований [14, 15] подобных процессов.

Режимы сгорания ацетиленовых смесей в закрытых трубах

В работах [10, 11] режимы сгорания газа в замкнутых объемах рассматриваются на примере ацетиленовых смесей двух типов: 1) $C_2H_2 + mO_2 + nN_2$; 2) $C_2H_2 + mN_2O + nN_2$. Опыты проводились в трубах с относительной длиной $L/d = 4\div 60$ (длина $L = 1\div 6$ м, диаметр $d = 0,07\div 0,25$ м).

*Докл. на Межд. конф. "Забабахинские чтения". Снежинск, 5–10 сент. 2005 г.

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ СГОРАНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМАХ

В смесях первого типа мольная концентрация ацетилена $\alpha = 2\div 45\%$, в смесях второго типа $\alpha = 0\div 90\%$. Начальное давление смеси газов $p_0 = 0,1\div 1,1$ МПа, начальная температура соответствовала температуре окружающей трубу воздуха и составляла (290 ± 10) К. Инициирование смесей осуществлялось вблизи торца трубы с помощью высоковольтного искрового разряда, взрыва проволоочки, взрыва электродстатора (ЭД), взрыва навески ВВ. Диапазон запасенной энергии инициирования составлял $0,2\text{--}40$ кДж.

Режим сгорания определялся по скорости процесса и по характеру изменения давления со временем на противоположном торце трубы и на боковой стенке, регистрируемому с помощью пьезоэлектрических датчиков [16] и промышленных потенциометрических датчиков типа ДТ. В режиме бездетонационного горения показания датчиков позволяли определить максимальное давление $p_{\text{макс}}$ продуктов горения в объеме трубы, полное время сгорания τ , равное времени достижения $p_{\text{макс}}$, а также среднюю скорость сгорания, определяемую как $v = L/\tau$ (рис. 1). Измерение периода циркулирующей акустической волны между торцами трубы позволяло определить скорость звука c_{pr} в продуктах горения.

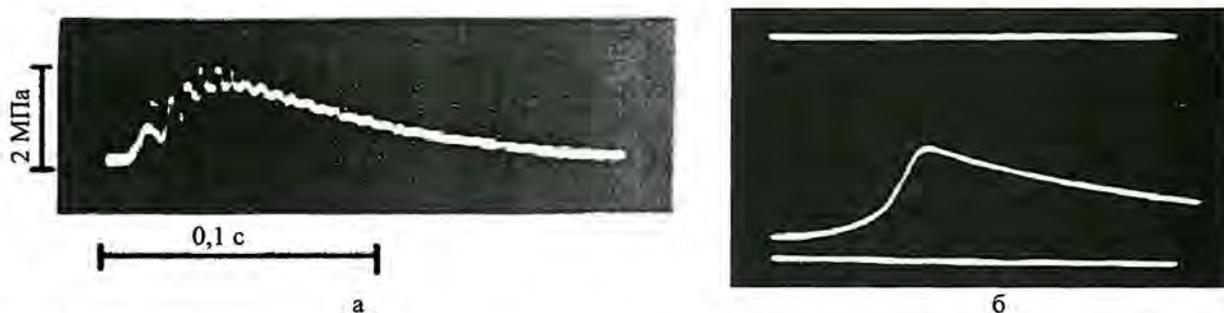


Рис. 1. Осциллограммы давления на закрытом торце трубы в режиме бездетонационного горения: а – смесь $C_2H_2 + 2,5O_2 + 21,5N_2$, $p_0 = 0,5$ МПа, $L = 2$ м, $d = 0,1$ м, инициирование искровым разрядом, регистрация с помощью пьезоэлектрического датчика; б – смесь $C_2H_2 + 12N_2O + 21N_2$, $p_0 = 0,7$ МПа, $L = 1$ м, $d = 0,25$ м, инициирование взрывом нихромовой проволоочки; нижний луч – нулевая линия, кривая – сигнал с потенциометрического датчика, верхний луч – калибровочный сигнал; полное время регистрации – 4 с, $p_{\text{макс}} = 5,4$ МПа

Режим перехода горения в детонацию определялся по факту образования скачка давления и по скорости его распространения (рис. 2). Кроме того, регистрация амплитуды и скорости циркулирующей ударной волны (УВ) позволяла судить о характере энерговыделения в замкнутом объеме. В ряде опытов осуществлялась покадровая фоторегистрация свечения продуктов горения через прозрачные оптические окна (рис. 3).

В работах [10, 11] установлены области концентраций компонентов исследуемых смесей, соответствующие горению, переходу горения в детонацию и детонации при достаточно мощном инициировании. В смесях первого типа с $\alpha = 2\div 7\%$ при инициировании высоковольтным искровым разрядом средняя скорость бездетонационного сгорания при $L/d = 20$ лежала в диапазоне $v = 30\div 100$ м/с, отношение максимального давления продуктов горения к начальному давлению смеси – $p_{\text{макс}}/p_0 = 3,4\div 6,8$, а скорость звука – $c_{pr} = 660\div 1100$ м/с. Увеличение либо α , либо L/d приводило к образованию переходного режима сгорания со скоростью УВ $D_1 = 600\div 900$ м/с и к детонации со скоростью $D_1 = 1300\div 2000$ м/с. В смесях второго типа с $\alpha = 1\div 3,2\%$ при инициировании взрывом нихромовой проволоочки средняя скорость бездетонационного сгорания при $L/d = 4$ и 10 лежала в диапазоне $v = 0,23\div 1$ м/с, $p_{\text{макс}}/p_0 = 6,4\div 12,9$. При α , близкой к нижнему концентрационному пределу, у закрытого торца происходило самовоспламенение смеси, адиабатически сжимаемой

продуктами медленного горения. С увеличением α до 8 % величина v возрастала до 50–100 м/с, а скорость звука составляла $c_{pr} = 800 \div 1000$ м/с. При $\alpha > 8$ % наблюдалась УВ с $D_1 = 300 \div 500$ м/с, что соответствует переходному режиму сгорания. В этом режиме поведение давления за фронтом отраженной УВ было существенно нестационарным, причем амплитуда давления в циркулирующей УВ приблизительно соответствовала амплитуде первого отражения (см. рис. 2). Данная особенность переходного режима сгорания, по всей вероятности, обусловлена неполным энерговыделением в "первой" УВ и с последующим догоранием смеси в отраженной УВ, циркулирующей между торцами.

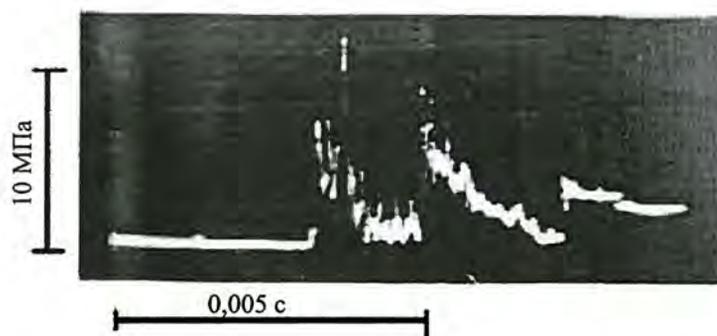


Рис. 2. Осциллограмма давления на закрытом торце трубы в режиме перехода горения в детонацию: смесь $C_2H_2 + 1,27N_2O$, $p_0 = 0,1$ МПа, $L = 1$ м, $d = 0,1$ м, инициирование взрывом нихромовой проволочки

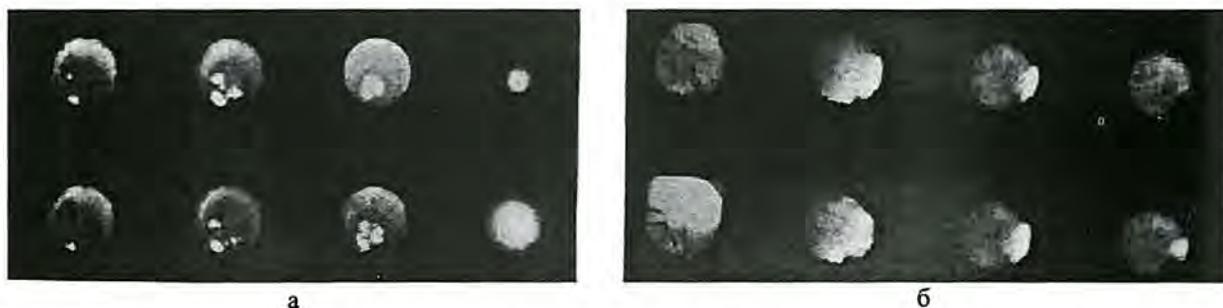


Рис. 3. Фоторегистрация свечения продуктов сгорания смеси $C_2H_2 + 60N_2O$ при инициировании взрывом ЭД ($L = 1$ м, $d = 0,1$ м): а — падающая ударная волна; б — отражение ударной волны. Промежуток между соседними кадрами $\Delta t = 16$ мкс

При взрыве электродетонатора в околопредельных смесях первого типа с $\alpha = 2 \div 10$ % и 30–45 %, а также в смесях второго типа с $\alpha = 1,6 \div 5$ % в трубах с $L/d = 10 \div 60$ был зарегистрирован низкоскоростной квазидетонационный процесс [10–12], скорость распространения которого зависела от состава смеси и лежала в диапазоне $D = 400 \div 700$ м/с. Для данного переходного режима сгорания характерно локализованное вблизи стенки трубы энерговыделение, подобное "спину" (см. рис. 3), а также постоянство скорости циркуляции отраженной УВ на базе в несколько сотен диаметров трубы. Следует отметить, что при одних и тех же начальных условиях в разных опытах наблюдались различные режимы энерговыделения: либо низкоскоростной квазидетонационный

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ СГОРАНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМАХ

процесс, либо нормальная детонация, описанная ранее в работах [17, 18] (рис. 4, 5). В режиме нормальной детонации зависимость давления от времени на закрытом торце трубы, полученная на основе данных измерений давления, соответствует расчетной кривой, полученной на основе аналитических выражений [19] для описания процесса отражения детонационной волны от абсолютно жесткой стенки (рис. 6).

Рис. 4. Зависимость скорости детонации от концентрации ацетилена в смеси $C_2H_2 + mO_2$: 1 – нормальная детонация; 2 – низкоскоростной квазидетонационный процесс; 3 – скорость звука в исходной смеси; + – данные работ [17, 18]; Δ – данные работы [12]: $p_0 = 0,1$ МПа, $L = 6$ м, $d = 0,1$ м, инициирование взрывом ЭД

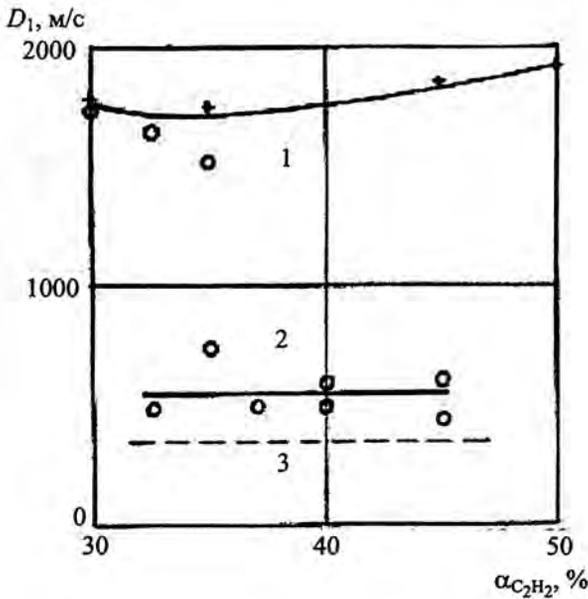
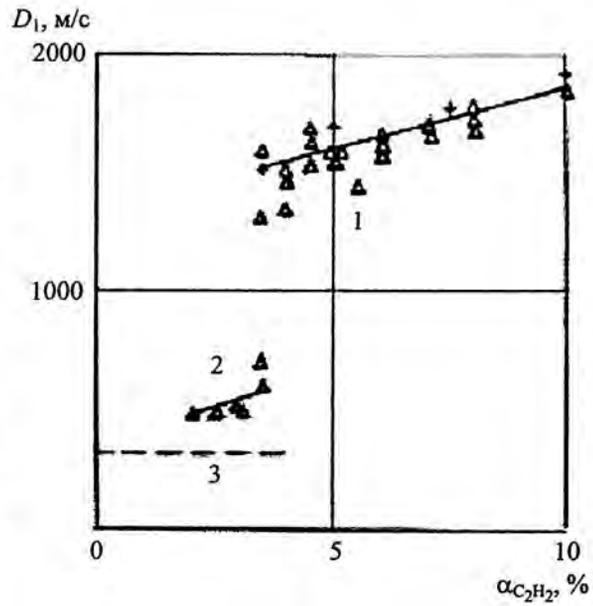


Рис. 5. Зависимость скорости детонации от концентрации ацетилена в смеси $C_2H_2 +$ воздух: 1 – нормальная детонация; 2 – низкоскоростной квазидетонационный процесс; 3 – скорость звука в исходной смеси; + – данные работ [17, 18]; o – данные работы [12]: $p_0 = 0,1$ МПа, $L = 6$ м, $d = 0,1$ м, инициирование взрывом ЭД

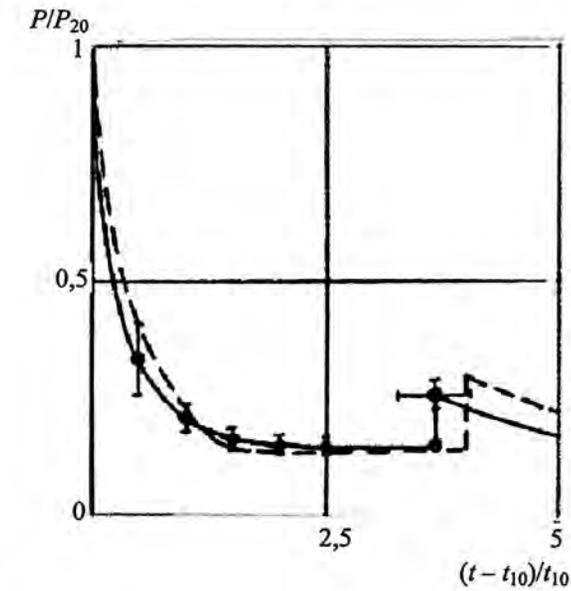


Рис. 6. Безразмерная зависимость давления от времени на закрытом торце трубы при отражении волн нормальной детонации в смесях $C_2H_2 + 2,5O_2 + nN_2$: t_{10} – время прихода фронта ударной волны к торцу; p_{20} – амплитуда давления. $L = 1,5$ и 6 м, $p_0 = 0,1$ и $0,5$ МПа; —●— эксперимент [11, 12], - - - - расчет [19]

Горение сталкивающихся открытых пропановоздушных облаков

В работах [14, 15] осуществлялось экспериментальное изучение влияния столкновений открытых приповерхностных топливно-воздушных облаков на параметры их горения. С этой целью проводились опыты как с одиночными резервуарами со сжиженным углеводородным топливом (пропан-бутан), так и с несколькими резервуарами. Исследуемые облака создавались с помощью взрывного диспергирования сжиженного пропан-бутана, первоначально находящегося в стандартных сварных баллонах. Резервуары разносились на расстояния, обеспечивающие среднюю концентрацию горючего в облаке, соответствующую пределам воспламенения ($\alpha \approx 2 \div 9$ % массовых [20]). Иницирование горения образовавшейся топливно-воздушной смеси осуществлялось с помощью взрывного впрыскивания порошка алюминия, что соответствует условиям [21] воспламенения воздушных смесей пропана в широком диапазоне температур. Такой способ создания реагирующей многофазной смеси имитирует наличие выбросов пылевых облаков при протекании аварий в режиме, когда полная масса твердых дисперсных примесей пренебрежимо мала по сравнению с массой первоначально сжиженного газа. Регистрация образования, воспламенения и сгорания топливно-воздушного облака осуществлялась с помощью скоростной киносъемки со скоростью 50 кадров в секунду. В одном из опытов процесс воспламенения регистрировался также с помощью видеосъемки со скоростью 2000 кадров в секунду.

Разлет сжиженного пропан-бутана из резервуаров происходил со средней скоростью $U = 30 \div 40$ м/с. Диапазон линейных размеров создаваемых облаков до их воспламенения составлял $L \approx 5 \div 20$ м. Воспламенение смеси происходило во множестве локальных очагов на поверхности разлета топлива. В течение $\sim 0,1$ с эти очаги сливались в единую область горения с характерным размером ~ 1 м. В дальнейшем эта область увеличивалась и распространялась по поверхности облака либо в виде сплошной по высоте облака границы свечения (рис. 7), либо в виде отдельных спиралеобразных "рукавов" пламени (рис. 8).

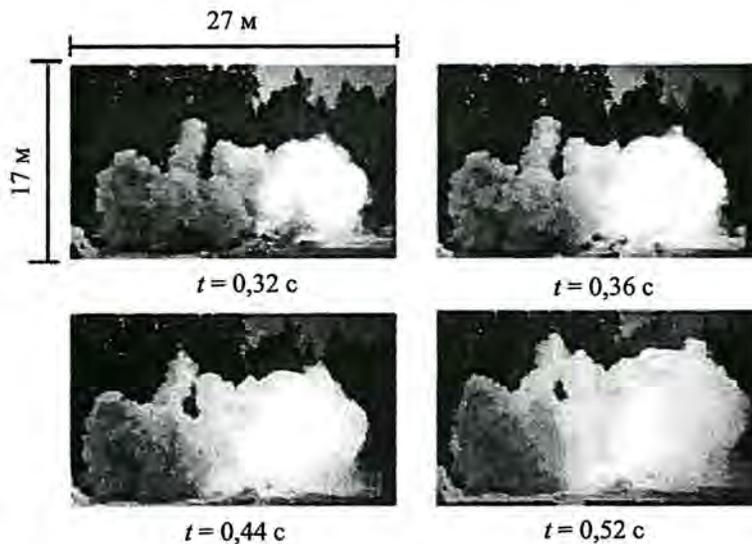


Рис. 7. Распространение пламени вдоль поверхности земли: линейная цепочка из 5 баллонов, разнесенных на расстояния 5 м друг от друга. Масса сжиженного пропан-бутана в каждом баллоне равна 21 кг

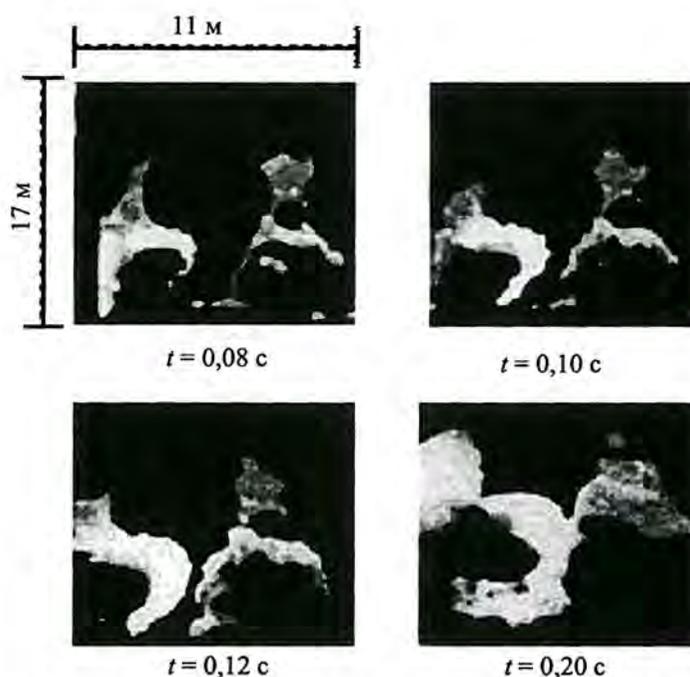


Рис. 8. Распространение спиралеобразного рукава пламени в облаке (спиновое горение вдоль свободной поверхности разлета топлива): фрагмент киносъемки в случае линейной цепочки из 5 баллонов (условия те же, что и на рис. 7)

В экспериментах [14, 15] установлено, что при создании цепочек сталкивающихся облаков происходит увеличение видимой скорости пламени по сравнению с одиночными облаками. Например, при сгорании одиночного облака, содержащего около 10 кг пропан-бутана (1 баллон емкостью 27 л), видимая скорость пламени вдоль поверхности земли составляла $U_f = 30 \text{ м/с}$. При сгорании "двойного" облака, содержащего около 20 кг пропан-бутана видимая скорость пламени составляла 50 м/с. При этом в облаке наблюдался также рукав пламени, распространяющийся с видимой скоростью около 80 м/с. Эти результаты указывают на то, что в создаваемых открытых пропано-воздушных облаках инициируется и развивается спонтанное горение, описанное в работах [22, 23]. Для этого процесса характерно образование отдельных рукавов пламени и локальных взрывов (самовоспламенения), обусловленных турбулизацией течения реагирующей смеси с градиентами концентраций компонентов и температур. В исследуемой системе крупномасштабные флуктуации указанных параметров являются вынужденными, так как они обусловлены организацией процесса образования и сгорания смеси реагентов путем взрывного диспергирования сжиженного топлива и металлического порошка в атмосферу, при котором не происходит равномерного перемешивания компонентов. При одиночных выбросах топлива [5, 6] в огненном шаре происходит поверхностное диффузионное горение в виде слабой дефлаграции. При групповых выбросах перемешивание топлива с воздухом может происходить в областях столкновений потоков и вблизи рукавов спонтанного горения со случайным направлением распространения. Можно попытаться оценить степень крупномасштабной автотурбулизации горения группы топливно-воздушных облаков, если определить число Рейнольдса течения реагирующей смеси на основе данных фоторегистрации

$$Re = \frac{\rho U_r l}{\eta} = \frac{\rho U_f l}{\eta \varepsilon} \quad (1)$$

Здесь ρ , η – плотность и динамическая вязкость смеси газов [24]; $\varepsilon \approx 6-8$ – степень расширения продуктов горения [7]; l – характерный пространственный масштаб, в частности поперечный к направлению распространения пламени размер области свечения продуктов горения (параметр, измеряемый с помощью кино съемки горения). Например, при распространении горения вдоль поверхности земли этот параметр равен высоте облака (см. рис. 7). При горении в рукавах (см. рис. 8) в качестве l следует брать толщину рукава. Такой подход связан с тем обстоятельством, что параметр U_r , определенный в экспериментах со сжиженным пропан-бутаном, разлетающимся в атмосферу со скоростью $U = 30-40$ м/с, значительно превосходит нормальную скорость пламени [7] $U_n = 0,6$ м/с – параметр, используемый при оценке автотурбулизации горения заранее приготовленной, первоначально покоящейся смеси газов.

Из формулы (1) получаем, что при дефлаграционном горении линейной цепочки облаков (см. рис. 7) с видимой скоростью $U_f \approx 50$ м/с и поперечным размером "фронта" $l = 7$ м число Рейнольдса пламени равно $Re \approx 3 \cdot 10^6$, а в случае спонтанного горения с видимой скоростью $U_f \approx 100$ м/с в рукаве с поперечным размером $l = 2$ м (см. рис. 8) число Рейнольдса пламени составляет $Re \approx 2 \cdot 10^6$.

Обсуждение результатов

Общей чертой переходных режимов сгорания ацетиленовых смесей в закрытых трубах и топливно-воздушных смесей на основе пропан-бутана в открытых облаках является локализованное энерговыделение в виде рукавов пламени (см. рис. 3 и рис. 8). Это связано с турбулентной природой процессов сгорания. Об этом свидетельствует, например, большая величина числа Рейнольдса пламени $Re \sim 10^6$ в открытых сталкивающихся облаках.

Представленные результаты показывают, что в закрытых трубах средние скорости сгорания смесей $C_2H_2 + mN_2O + nN_2$ с концентрацией ацетилена $\alpha = 1-3$ % приблизительно на два порядка меньше, чем средние скорости сгорания смесей $C_2H_2 + mO_2 + nN_2$ с $\alpha = 4-7$ %. Это делает их более предпочтительными для безопасной эксплуатации энергетических установок, в частности ГДЛ, в режиме медленного горения.

Отличительной особенностью сгорания в закрытых трубах при достаточно мощном (взрывном) инициировании является формирование устойчивой низкоскоростной квазидетонации (см. [10, 11] и рис. 4, 5) между торцами. Как показали эксперименты [10, 11], разрушения труб происходили в тех случаях, когда процесс сгорания протекал в режиме, промежуточном между бездетонационным горением и нормальной детонацией. По всей вероятности, это обусловлено возникновением каскадных процессов [2, 25], при которых в локализованных областях отраженной волны возникают экстремально высокие импульсные давления. Следовательно, использование в замкнутых сосудах смесей с концентрацией ацетилена, соответствующей переходным режимам сгорания, крайне опасно.

В режиме нормальной детонации скорости сгорания исследованных ацетиленовых смесей в закрытых трубах при равных концентрациях горючего приблизительно одинаковы (см. [10, 11] и рис. 4, 5). Установленное соответствие экспериментальной и расчетной зависимостей давления от времени при отражении волны детонации от закрытого торца трубы (см. рис 6) позволяет расчетным путем прогнозировать отклик стенок установки на возникновение в ней детонационного режима сгорания.

Выводы

1. Найдены составы горючих газовых смесей $C_2H_2 + mN_2O + nN_2$, пригодных для безопасной эксплуатации в замкнутых энергетических установках, в частности ГДЛ, в режиме медленногорения со средней скоростью 0,2–1 м/с.
2. Установлено соответствие экспериментальной и расчетной зависимостей давления от времени на закрытом торце трубы при отражении волны нормальной детонации.
3. Определены общие черты и отличительные особенности переходных режимов сгорания углеводородов в закрытых трубах и в сталкивающихся открытых облаках.
4. Предложено определение числа Рейнольдса Re течения реагирующей смеси в открытых ТВО по данным фоторегистрации распространения пламени.
5. Полученные оценки $Re \sim 10^6$ свидетельствуют о высокой степени турбулизации горения в сталкивающихся открытых ТВО при линейных размерах $\sim 10^1$ м.

Список литературы

1. Бейкер У., Кокс П. Взрывные явления. Оценка и последствия. М.: Мир, 1986. Кн. 1.
2. Нетлетон М. Детонация в газах. М.: Мир, 1989.
3. Маршал В. Основные опасности химических производств. М.: Мир, 1989.
4. Гельфанд Б. Е., Махвиладзе Г. М., Новожилов В. Б. и др. Об оценке характеристик аварийного взрыва приповерхностного паровоздушного облака // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 2. С. 75–81.
5. Махвиладзе Г. М., Януш С. Е. Моделирование огненных шаров при горении выбросов углеводородных топлив // XII Симпозиум по горению и взрыву. Часть II. Газодинамика. Черногоровка: ИПХФ РАН, 2000. С. 95–97.
6. Болодьян И. А., Карпов В. Л., Лагозин А. Ю. и др. О режиме сгорания газопаровоздушных облаков на объектах нефтегазодобычи // XII Симпозиум по горению и взрыву. Часть III. Безопасность. Черногоровка: ИПХФ РАН, 2000. С. 35–36.
7. Макеев В. И., Болодьян И. А., Пономарев А. А., Строгонов В. В. Переход газовой дефлаграции в детонацию в свободном и загроможденном пространствах // Химическая физика. 2001. Т. 20, № 9. С. 60–68.
8. Физика взрыва / Под ред. Орленко Л. П. М.: Физматлит, 2002. Т. 1.
9. Гаржанов В. И., Теличко И. В., Вильданов В. Г. и др. Детонация в пропановоздушных составах при инъекции горячих продуктов детонации // Труды Международной конференции «V Харитоновские тематические научные чтения». Энергетические материалы и физика детонации. Саров: ВНИИЭФ, 2003. С. 198–203.
10. Герасименко В. Ф., Лин Э. Э. Экспериментальное изучение режимов сгорания смесей $C_2H_2 + N_2O + N_2$ в замкнутых цилиндрических камерах // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 4. С. 38–40.
11. Лин Э. Э., Фунтиков А. И. Экспериментальное изучение режимов сгорания смесей $C_2H_2 + O_2 + nN_2$ в замкнутых трубах // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 2. С. 43–46.

12. Lin E. E. Experimental Study of Combustion Regimes for Acetylene Mixtures in Closed Tubes // Materials of Int. Conf. On Combustion (ICOC93). Moscow – St. Petersburg, Russia. 21–26 June 1993. P. 29.
13. Булкин Ю. Н., Выскубенко Б. А., Кириллов Г. А., Кормер С. Б., Линник В. М., Савин Ю. В., Урлин В. Д. Исследование газодинамического лазера на продуктах сгорания ацетилена // Квантовая электроника. 1981. Т. 8, № 6. С. 1202–1207.
14. Пат. 2216531. Способ образования и взрыва топливно-воздушного облака / С. К. Жабицкий, Э. Э. Лин, С. А. Новиков, С. В. Прохоров // Б.И. 2003, № 32. С. 461.
15. Жабицкий С. К., Лин Э. Э., Новиков С. А. и др. Система для моделирования аварийных ситуаций, в том числе аварийных выбросов сжиженного топлива. Патент на изобретение № 2262070 // Бюл. № 28. 10.10.2005.
16. Лин Э. Э., Сиренко А. В., Фунтиков А. И. Об изменении давления со временем в отраженной ударной волне при взрыве листового заряда ВВ // Физика горения и взрыва, 1979. Т. 15, № 2. С. 180–182.
17. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1968.
18. Иванов Б. А. Физика взрыва ацетилена. М.: Химия, 1969.
19. Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды. М.: Наука, 1971.
20. Химическая энциклопедия / Под ред. Зефирова Н. С. М.: Большая Российская энциклопедия. 1995. Т. 4. С. 101.
21. Борисов А. А., Кнорре В. Г., Пчельников А. В. и др. Экспериментальное исследование самовоспламенения пропана в воздухе // XII Симпозиум по горению и взрыву. Часть II. Черноголовка: ИПХФ РАН, 2000. С. 67–69.
22. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е., Цыганов С. А. Спонтанные режимы горения // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 13–19.
23. Khokhlov A. M., Oran E. S. A theory of deflagration - to - detonation transition in unconfined flames // Combustion and Flame. 1997. Vol. 108. P. 503–517.
24. Физические величины. Справочник / Под ред. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З. М.: Энергоатомиздат, 1991.
25. Когарко С. М. Исследование давления в торце трубы при нестационарном быстром горении // Журнал технической физики. 1958. Т. 28. Вып. 9. С. 2042–2045.

Features of Transitional Regimes of Hydrocarbons Burning in Closed Volumes and in Open Clouds

E. E. Lin, Z. V. Tanakov

We present a review and brief analysis of experimental results concerned to simulation of processes both in power-plants and in open-air surface space, when burning out hydrocarbons gaseous mixtures. Combustion regimes in closed volumes are considered for acetylene mixtures in closed tubes. Combustion of open-air fuel clouds at regime of them collisions are considered for propane-butane, when dispersing in atmosphere from several closely located reservoirs with liquefied gas.