

Н. Н. Смирнов, М. В. Тюрников

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В УГЛЕВОДОДОВОЗДУШНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Экспериментально исследуется процесс перехода медленного горения углеводородовоздушной смеси к самоподдерживающейся детонации в модельной трубе при зажигании смеси у закрытого торца трубы. Рассматриваются различные механизмы возникновения детонации и процесс выхода возникающей сильной детонации на самоподдерживающийся режим. Исследуется влияние установки механического препятствия в конце переходного участка на стабилизацию места возникновения детонации и сокращение длины переходного участка.

При поджигании газовой горючей смеси в трубе при определенных условиях из нормального горения самопроизвольно развивается детонация. Экспериментальные и теоретические исследования [1—5] показывают, что процесс перехода горения в детонацию включает в себя ускорение пламени, вызванное расширением горячих продуктов сгорания за волной горения (возможно последующее торможение пламени вследствие прекращающего действия продуктов сгорания и теплоотвода в стенку трубы, а затем новое ускорение пламени [3, 5]), возникновение волн сжатия перед пламенем с последующим образованием ударных волн (УВ), развитие турбулентности впереди волны горения и внутри нее (обусловленное увеличением скорости потока), искривление фронта горения и рост площади его поверхности, приводящий к повышению скорости распространения пламени.

Исследования [5—8] для смесей горючего с кислородом показали, что детонация наступает в области сильно турбулизованного течения сжатого газа между фронтом первичной УВ и пламенем (обычно вблизи стенки трубы) либо на самом фронте пламени (иногда даже внутри турбулентной зоны пламени) либо на некотором расстоянии перед пламенем вследствие местного самовоспламенения сжатой смеси (включая возникновение детонации и на контактных поверхностях за первичной УВ). Одновременно в обратном направлении от места возникновения детонации распространяется ретонационная волна. В некоторых случаях, например в поршневых двигателях, наблюдается объемный взрыв сжатого газа, происходящий в результате возникновения в газе центров самовоспламенения, из которых начинается спонтанное распространение пламени с высокой скоростью во всех направлениях [9—11]. Любые факторы, приводящие к неустойчивости фронта пламени или ударного фронта, облегчают переход к детонации [12]. Следует отметить, что в основном исследования переходного процесса проводились с использованием смесей горючего с кислородом. До настоящего времени механизм переходных процессов в смесях горючего с воздухом малоизучен.

Возобновление исследований переходного процесса вызвано применением для решения ряда прикладных задач детонационных установок [13—15], в которых детонационный режим горения достигается путем перехода медленного горения в детонацию при зажигании горючей смеси у закрытого торца трубы. Использование в таких установках углеводородовоздушных смесей, значительно повышающих эксплуатационные характеристики установок, но обладающих пониженными энергетическими характеристиками детонации и детонационной способностью по сравнению с углеводородокислородными смесями [16], вызывает необходимость проведения поиска элементов конструкции трубы, направленных на сокращение длины переходного участка (в гладкостенных трубах при нормальных условиях преддетонационная длина для углеводородовоздушных смесей составляет 80—120 диаметров трубы [17]), на повышение параметров течения в трубе (давления, плотности, массовой скорости), на стабилизацию места возникновения детонации (место возникновения детонации в определенных пределах носит стохастический характер). В [18, 19] проведены исследования сокращения длины

переходного участка в углеводородовоздушных смесях за счет установки в канале трубы турбулизаторов потока с оптимально подобранными характеристиками.

В настоящей работе исследуются переход медленного горения углеводородовоздушной смеси к устойчивости детонации в модельной трубе и влияние на него механического источника возмущения потока, установленного в конце переходного участка, с целью стабилизации места возникновения детонации и сокращения длины переходного участка. Волновые процессы исследованы теньвым методом с применением лазерного источника подсветки, что позволяет достигать высокого временного и пространственного разрешения [20].

Постановка эксперимента

Схема модельной трубы представлена на рис. 1. Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности каналов секций трубы, выполненных из стали, составляет 6,3 мкм. Форкамера установлена для ускорения пламени в трубе. Оптическая секция для съемки различных стадий развития переходного процесса перемещается вдоль оси трубы при сохранении общей ее длины. Датчик, имеющий наружную цилиндрическую резьбовую поверхность диаметром 18 мм, вворачивается в резьбовое отверстие, расположенное в центре нижней грани оптической секции, и может образовывать в канале источник возмущения в виде цилиндрического уступа. Горючая смесь медленно поступает в трубу через обратный клапан и вытекает через открытый торец трубы в атмосферу. Смесь зажигается электрической искрой (энергия электроразряда ~ 50 мДж). При повышении давления в камере зажигания за счет горения обратный клапан закрывается. Труба заполнялась стехиометрической смесью воздуха с метилциклопропаном (C_4H_6).

Оптическая схема теневого фотохронографирования представлена на рис. 2. Линзы 4, 5 формируют горизонтальную световую плоскость с перетяжкой толщиной 0,5 мм, проходящую через ось симметрии канала. Линзы 7, 9 формируют изображение перетяжки световой плоскости на фотопленке. Зеркала 10, 11 из комплекта высокоскоростной камеры ВСК-5 обеспечивают деление луча для формирования двух изображений, равных по интенсивности. Линза 12 компенсирует разность хода лучей, клин 13 устраняет частичное наложение изображений. Синхронизация съемки процесса с моментом прохождения волн в оптической секции осуществляется с применением индукционного датчика в виде провода, намотанного на высоковольтный провод катушки зажигания. Электрический импульс с датчика открывает щелевой электромагнитный затвор, расстояние от края щели которого определяет задержку, а длина щели — длительность лазерного излучения в исследуемую область. Датчик давления (см. рис. 1, 6, собственная частота колебаний 40 кГц) контролирует момент прохождения первичной УВ относительно лазерного импульса.

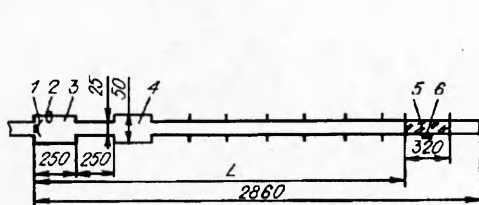


Рис. 1. Схема модельной трубы (L — расстояние от начала оптической секции до клапанной решетки).

1 — обратный клапан; 2 — свеча зажигания; 3 — камера зажигания; 4 — форкамера; 5 — оптическая секция с поперечным сечением 25×25 мм; 6 — пьезоэлектрический датчик давления.

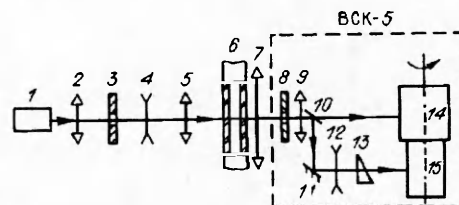


Рис. 2. Оптическая схема (линзы 2, 4, 7, 9, 12 — сферические, 5 — цилиндрическая).

1 — аргоновый непрерывный лазер ЛГ-106М-1 (диапазон генерируемых длин волн $0,46 - 0,52$ мкм); 2, 5, 7, 9 — положительные линзы; 3 — щелевой электромагнитный затвор; 4, 12 — отрицательные линзы; 6 — оптическая секция; 8 — электромагнитный затвор высокоскоростной камеры; 10 — полупрозрачное зеркало; 11 — глухое зеркало; 13 — оптический клин; 14, 15 — развертывающие четырехгранные зеркала.

Результаты эксперимента

До перехода горения к детонации ($L = 1530$ мм) наблюдалась волновая картина, представленная на рис. 3 (на фоторегистрограммах пламя распространяется слева направо, время возрастает снизу вверх). Впереди распространяются две первичные УВ, возникшие на ранних стадиях переходного процесса. Первая волна образуется в результате выталкивающего поршневого воздействия продуктов сгорания, истекающих из камеры зажигания, вторая — при ускорении пламени в форкамере, которое происходит в результате образования взаимопроникающего движения горячего газа перед пламенем при отражении первой первичной волны от стенок форкамеры, резкого увеличения кривизны и площади фронта и одновременного поршневого воздействия на пламя продуктов сгорания, истекающих из камеры зажигания.

Ускоряющийся фронт пламени возбуждает волны сжатия, которые формируют перед пламенем головную УВ. Образовавшийся комплекс УВ с горением за ней ускоряется и нагоняет первичные волны (рис. 4). На конечной стадии переходного участка ($L = 1690$ мм) возникали различные переходы горения в детонацию. На рис. 5, а представлен случай, когда комплекс головная волна — пламя уже достиг первичные волны и распространяется по невозмущенной смеси. Детонация возникает непосредственно на фронте пламени. На рис. 5, б показан случай, когда комплекс головная УВ — пламя нагоняет первичные волны. Между головной волной и пламенем на

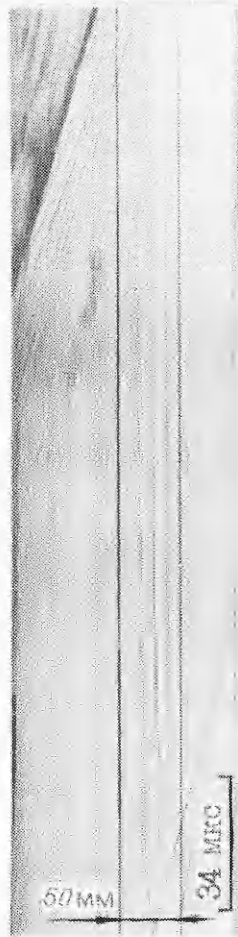


Рис. 3. Волновая картина до перехода горения в детонацию. Слабые поперечные возмущения между масштабными линиями возникают при торможении потока в месте установки датчика давления.



Рис. 4. Волновая картина до перехода горения в детонацию. Образование комплекса головная волна — фронт пламени.

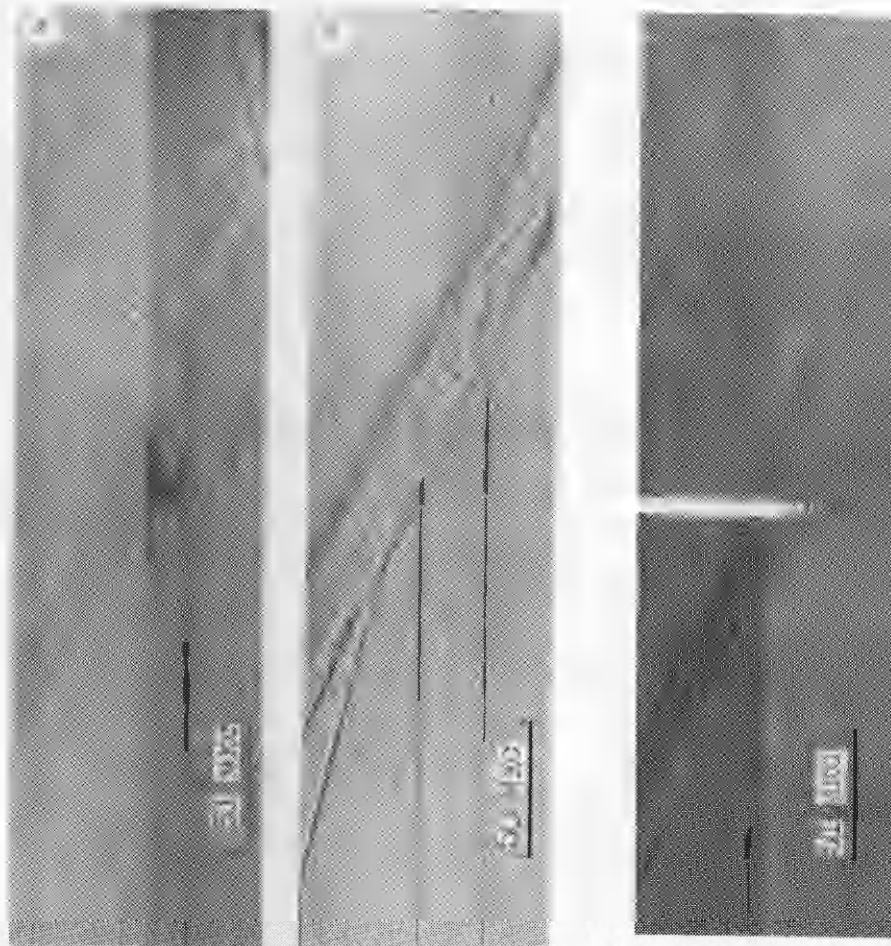


Рис. 5. Различные механизмы возникновения детонации.

Рис. 6. Объемный взрыв сжатого газа.

контактной поверхности, возникающей при взаимодействии первичных волн, смесь воспламеняется. Зона очага горения расширяется в обе стороны.

На рис. 6 представлен случай, когда на контактных поверхностях, образованных при взаимодействии порожденных ускоряющимся пламенем волн сжатия с головной волной, происходит последовательное воспламенение смеси. Процесс имеет аналогию с объемным взрывом, вызванным спонтанным распространением пламени. На рис. 7 изображена $x - t$ -диаграмма этого процесса. Возникающие очаги горения на контактных поверхностях расширяются в обе стороны, что приводит к образованию объемного воспламенения смеси между пламенем и головной волной. В случаях, приведенных на рис. 5, б и 6, детонационная волна (ДВ) возникает в области воспламенения смеси за пределами зоны съемки, о чем свидетельствует приход ретонационной волны. Волны сжатия возникают в результате торможения потока на стыках между секциями. Траектории частиц газа прослеживаются по движению контактных поверхностей. Сопоставление рассмотренных случаев наглядно показывает стохастичность места возникновения детонации. Длина переходного участка изменялась в интервале 1850—2010 мм.

Характерная волновая картина возникновения детонации при вводе на этом участке источника возмущения потока в виде цилиндрического уступа представлена на рис. 8, а. Впереди распространяется первая первичная волна, ее нагоняет комплекс головная волна — пламя. Головная волна уже догнала вторую первичную волну. При их взаимодействии образовалась контактная поверхность, распространяющаяся за головной волной. Между головной волной и пламенем, когда контактный разрыв подходит к источнику возму-

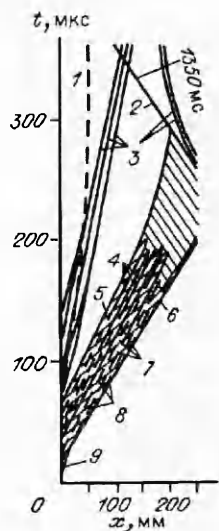


Рис. 7. $x - t$ -Диаграмма.

1, 8 — контактные поверхности; 2 — ретонационная волна; 3 — волны, возникающие при торможении потока на стыках между секциями; 4 — очаги воспламенения смеси; 5 — пламя; 6 — головная волна; 7 — волны сжатия, возбуждаемые пламенем; 9 — первичная волна.

щения, на контактном разрыве появляется очаг воспламенения смеси. В зоне очага горения образуется ДВ, которая распространяется в обоих направлениях и дожигает полностью не прореагировавшую смесь в очаге горения. Ретонационная волна является детонационной до встречи с пламенем, а затем вырождается в УВ. В области, заключенной между собственно детонационной и ретонационной волнами, наблюдаются волны, идущие от места образования детонации в разные стороны с большой скоростью, так что волны, идущие вперед, догоняют и подпитывают собственно ДВ, а волны, идущие назад, догоняют и подпитывают ретонационную волну. Эти волны, возникшие в результате отражения ДВ от стенок трубы, первоначально поперечные. Поэтому траектории их движения образуют на фотохронограмме параболы, выпуклые в сторону места возникновения детонации, причем вершины парабол со временем смещаются вперед, что свидетельствует о том, что поперечные волны сносятся потоком продуктов сгорания.

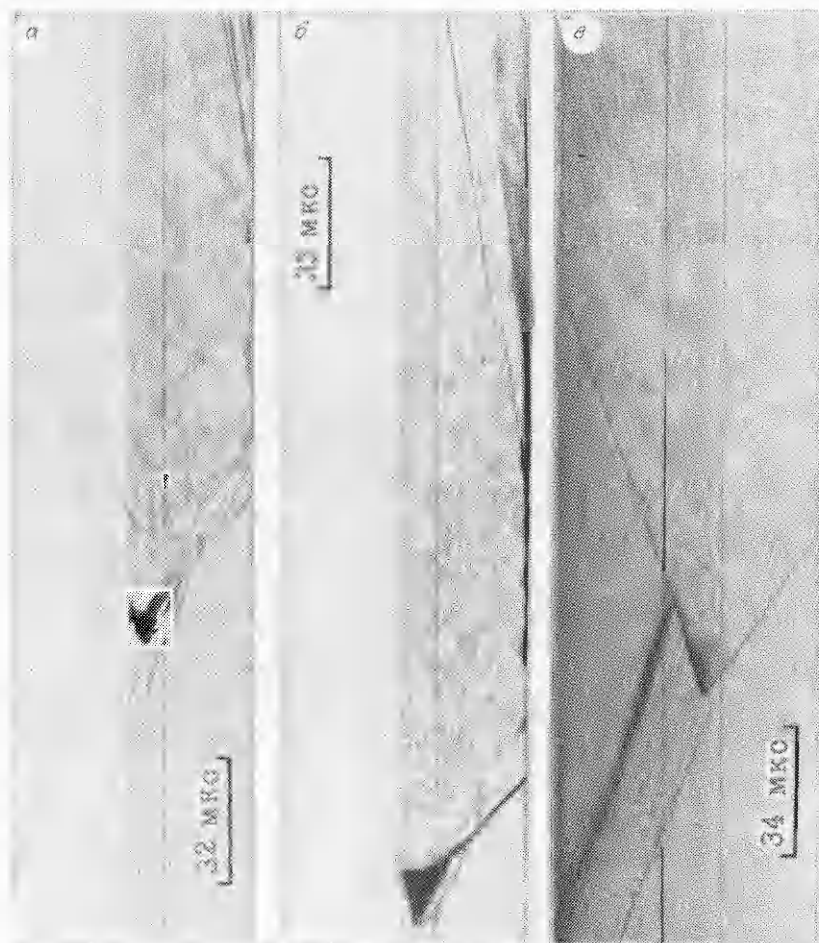


Рис. 8. Возникновение детонации под воздействием источника возмущения в виде цилиндрического уступа. Диаметр уступа 18 мм, глубина — 5 мм. Ось симметрии уступа проходит посреди масштабных линий.



Рис. 9. Выход детонации на самоподдерживающийся режим.

Качественно место перехода горения к детонации характеризуется образованием ретонационной волны, сменой характера свечения фронта горения и сильным колебательным движением продуктов сгорания. На рис. 8, б показана еще одна волновая картина этого процесса. Необходимо отметить, что на рис. 8, а, б формированию детонационной и ретонационной волн предшествует появление очага спонтанного горения. На фоторазвертке, представленной на рис. 8, в, ДВ возникает мгновенно при подходе контактной поверхности к уступу. При этом происходит сложное взаимодействие отраженных волн, о чем свидетельствуют изломы волновых поверхностей. Установка уступа надежно стабилизировала место появления детонации при числе Рейнольдса потока перед пламенем 10^6 — 10^7 , при этом детонация возникала в результате торможения потока вблизи задней стенки уступа. Длина переходного участка составила 1850 мм.

При выходе детонационной волны в невозмущенную смесь возникает сильная ДВ. На рис. 8 представлены случаи, когда детонация на самоподдерживающийся режим выходит постепенно. На характер затухания сильной детонации помимо волн, образующихся в результате отражения ДВ от стенки трубы, оказывают влияние также волны сжатия, генерируемые пламенем. При взаимодействии этих волн с ретонационной волной детонации в области за ретонационной волной образуются волны сжатия, которые преломляются на поверхностях разрывов, ускоряются, догоняют волну сильной детонации и взаимодействуют с ней (рис. 8, в). Скорость детонации постепенно убывает до стационарной (рис. 9, а, $L = 2130$ мм). На рис. 9, б представлено

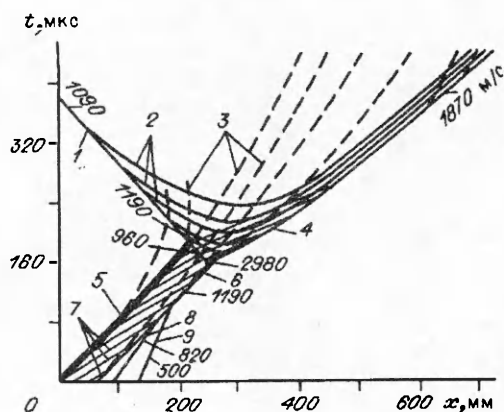


Рис. 10. $x - t$ -Диаграмма процесса перехода горения к самоподдерживающейся детонации.

1 — детонационная волна; 2 — волны сжатия, возникающие при отражении детонации от стенки трубы; 3 — контактные поверхности; 4 — ДВ; 5 — пламя; 6 — головная волна; 7 — волны сжатия, возбуждаемые пламенем; 8 — вторая первичная волна; 9 — первая первичная волна.

прохождение самоподдерживающейся ДВ со скоростью $v = 1870$ м/с ($L = 2380$ мм). За ДВ происходит образование возмущений плотности — шлейфов, растянутых на несколько диаметров

трубы, что свидетельствует о наличии в структуре детонационной волны поперечных детонационных фронтов [21]. Длина участка от места возникновения детонации до выхода на самоподдерживающийся режим составляла ~ 400 мм. На рис. 9, в показан случай другого характера затухания сильной детонации. ДВ возникла за головной УВ, распространяющейся по возмущенной первичной волной смеси, и после встречи с головной волной начинает выходить на самоподдерживающийся режим в смеси за первичной УВ. При выходе ДВ в невозмущенную смесь ее скорость интенсивно снижается до стационарного значения, что связано с ослаблением подпитки сильной ДВ по мере ее удаления от места возникновения детонации. Общая картина волнообразования при переходе горения к самоподдерживающейся детонации для одного из приведенных случаев (рис. 8, в) показана на $x - t$ -диаграмме (рис. 10).

Обсуждение результатов

На начальных стадиях распространения пламени в модельной трубе в результате двух последовательных его ускорений сначала за счет поршневого действия продуктов сгорания, истекающих из камеры зажигания, а затем в форкамере перед пламенем образуются две первичные УВ, уходящие от него к открытому торцу. В результате поршневого воздействия на пламя продуктов сгорания, истекающих из форкамеры, пламя, минуя стадию торможения [3, 5], переходит в канале трубы на режим самоускорения, формируя перед собой головную УВ, которую подпитывает слабыми волнами. Детонационноподобный комплекс ударной волны с горением (см. рис. 3, 4) ускоряется и нагоняет первичные волны. При взаимодействии головной волны с первичными волнами и со слабыми волнами, генерируемыми пламенем, образуются контактные поверхности, распространяющиеся за головной волной.

В эксперименте выявлены следующие механизмы возникновения детонации в углеводородовоздушной смеси:

1) детонационная волна возникает непосредственно на фронте пламени (см. рис. 5, а);

2) ДВ образуется между головной волной и пламенем на контактной поверхности, образованной при взаимодействии головной и первичной УВ (см. рис. 8, в);

3) детонация наблюдается в области между головной волной и пламенем в очаге горения смеси, возникающем на контактной поверхности, образованной при взаимодействии головной волны с первичной (см. рис. 5, б и 8, а, б);

4) ДВ возникает в результате объемного спонтанного воспламенения сжатого газа между головной волной и пламенем (см. рис. 6).

Проведенные эксперименты показывают, что в отличие от обнаруженных механизмов возникновения детонации в смесях горючего с кислородом

детонация в углеводородовоздушных смесях, обладающих пониженной реакционной способностью, возникает не в произвольном месте между головной волной и пламенем, а вследствие самовоспламенения именно на контактных поверхностях. Последнее обстоятельство связано с уменьшением периода индукции воспламенения при возрастании температуры (температура газа на контактном разрыве больше со стороны головной волны).

Полученный результат позволяет уточнить механизм объемного взрыва сжатого газа, возникающего при переходе горения к детонации [9, 10]. Объемный взрыв является результатом почти одновременного спонтанного воспламенения газа на расположенных близко контактных поверхностях, возникающих при слиянии головной волны с волнами сжатия, возбуждаемыми пламенем (см. рис. 6, 7).

При установке в конце переходного участка источника возмущения потока (уступа) ДВ стабильно появляется на контактной поверхности при подходе контактной поверхности к источнику возмущения вследствие торможения потока либо мгновенно (см. рис. 8, в), либо с некоторой задержкой в образующемся очаге горения газа (см. рис. 8, а, б). Ввод источника возмущения приводил к надежной стабилизации начала детонации и к сокращению преддетонационного расстояния на 10—15 %.

Скорость ДВ относительно стенок трубы на участке от места возникновения до выхода в невозмущенную смесь достигает ~3000 м/с (см. рис. 5, а, 8 и 10). Известно, что при возникновении ДВ часто имеет скорость и давление значительно большие, чем в самоподдерживающемся режиме (см., например, данные [4], согласно которым в смеси СО и О₂ $D = 3260$ м/с). Столь высокое значение D в модельной трубе получено главным образом за счет высокой переносной скорости потока за первичными волнами в результате поршневого действия продуктов сгорания, истекающих из камеры зажигания и форкамеры (значение D также возрастает вследствие предварительного поджатия смеси [22]). Эффект изменения геометрии канала трубы на участке распространения пламени наряду с усилением детонации в сужающемся канале [13] может быть использован для повышения параметров течения в трубе.

При выходе ДВ в невозмущенную смесь возникает сильная детонационная волна. Характер затухания сильной детонации связан с развитием процесса перехода горения к детонации и зависит от воздействия на нее волн, возбужденных пламенем, и энергии взрыва сжатой перед пламенем смеси. Приведенные случаи наглядно иллюстрируют поведение ДВ на разрыве в зависимости от граничных условий.

Таким образом, исследован процесс перехода горения углеводородовоздушной смеси к устойчивой детонации в модельной трубе при зажигании смеси у закрытого торца трубы. Выявлены различные механизмы появления детонации. Показано, что в углеводородовоздушных смесях эти механизмы в основном совпадают с обнаруженными в смесях горючего с кислородом. Рассмотрен процесс выхода возникающей сильной детонации на самоподдерживающийся режим. Показана принципиальная возможность повышения параметров течения в трубе за счет создания поршневого эффекта продуктов сгорания. Исследовано влияние установки механического препятствия в конце переходного участка на стабилизацию начала детонации и сокращение длины переходного участка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щелкин К. И., Трошин Я. К. Газодинамика горения. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.
2. Зельдович Я. Б., Компанец А. С. Теория детонации. — М.: Гостехиздат, 1955.
3. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1957.
4. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. — М.: ИЛ, 1948.
5. Некоторые методы исследования быстропотекающих процессов и их применение к изучению формирования детонационной волны/Саламандра Г. Д., Баженова Т. В., Зайцев С. Г. и др. — М.: Изд-во АН СССР, 1960.

6. Urtiew P. A. and Oppenheim A. K. Experimental observation of the transition to detonation in an explosive gas // Proc. Roy. Soc.— 1966.— A 295.— P. 13.
7. Oppenheim A. K., Liderman A. J. and Urtiew P. A. On the onset of detonation // Comb. and flame.— 1962.— 6.— P. 193.
8. Солоухин Р. И. Переход горения в детонацию в газах // ПМТФ.— 1961.— № 4.— С. 128—132.
9. Воинов А. Н. Экспериментальное исследование детонации в двигателях // Сгорание в транспортных поршневых двигателях/Под ред. Е. А. Чудакова.— М.: Изд-во АН СССР, 1951.— С. 112.
10. Соколик А. С. Основы теории детонации в двигателях/Там же.— С. 185.
11. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е., Цыганов С. А. Спонтанные режимы горения // ФГВ.— 1992.—28, № 5.— С. 13— 27.
12. Неглетон М. Детонация в газах.— М.: Мир, 1989.
13. Вопросы использования детонации в технологических процессах. Сб. научн. тр. Под ред. В. В. Митрофанова.— Новосибирск: ИГиЛ СО АН СССР, 1986.
14. Шамшев К. Н., Товчигречко В. Н., Соболев Л. Ю. и др. Экспериментальные и теоретические исследования мощных акустических импульсов в атмосфере // Акуст. журн.— 1988.—XXXIV, вып. 2.— С. 232—236.
15. Бойченко А. П., Смирнов Н. Н. Динамика взаимодействия термогазодетонационного бурильного инструмента с грунтами // Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред.— Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1984.— С. 75—79.
16. Борисов А. А., Лобань С. А. Пределы детонации углеводородовоздушных смесей в трубах // ФГВ.—1977.—13, № 5.— С. 729—733.
17. Lindstedt R. P., Michels H. J. Deflagration to Detonation Transition in Mixtures of Alkane LNG/LPG Constituents with O₂/N₂ // Comb. and Flame.—1988.—72, № 1.— P. 63—72.
18. Lindstedt R. P., Michels H. J. Deflagration to Detonation Transitions and Strong Deflagrations in Alkane and Alkene Air Mixtures // Ibid.—1989.—76, № 2.— P. 169—181.
19. Васильев А. А. Оптимизация условий перехода горения в детонацию для газовых смесей/Тез. докл. Всесоюз. симп. (г. Алма-Ата, 21—25 октября 1991 г.).— Новосибирск, 1991.—С. 36—37.
20. Клишкин В. Ф., Папырин А. Н., Солоухин Р. И. Оптические методы регистрации быстропротекающих процессов.— Новосибирск: Наука, 1980.
21. Митрофанов В. В. Теория детонации.— Новосибирск, 1982.
22. Физика взрыва/Под ред. К. П. Станюковича.— М: Наука, 1975.

119899, Москва,
МГУ

Поступила в редакцию 19/111 1993,
после доработки — 10/VII 1993

УДК 534.222.2:532.529

А. И. Сычев

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЫ СУЩЕСТВОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕДАХ

Экспериментально изучены детонационные волны в одно- и многокомпонентных пузырьковых средах. Получены данные о критических условиях инициирования, структуре и свойствах волн детонации. Установлены энергетические пределы и определены области существования детонационных волн в исследованных системах.

Детонация в пузырьковых средах — явление, обладающее большой степенью общности. Системы жидкость — пузырьки газа, в которых обнаружены волны детонации, разнообразны:

— однокомпонентные по газовой фазе системы [1—3]: I — химически неактивная жидкость — пузырьки смеси химически активных и неактивных газов, II — жидкое горючее — пузырьки смеси газообразного окислителя и химически неактивных газов;

— многокомпонентные системы [4]: I — химически неактивная жидкость — смесь пузырьков химически активных газов и пузырьков неактивных газов, II — жидкое горючее — смесь пузырьков газообразного окислителя и пузырьков химически неактивных газов, (I—II) — жидкое горючее — смесь пузырьков газообразного окислителя и пузырьков химически активных газов.

Таким образом, детонационные волны (ДВ) существуют в системах, физико-химические свойства которых различаются в широком диапазоне. Область существования волн детонации в пузырьковых средах может огра-

© А. И. Сычев, 1994.