

Параметры детонационных волн в канале переменного сечения в смеси метана с кислородом и азотом

05, май 2014

DOI: 10.7463/0614.0712204

Бивол Г. Ю.¹, Головастов С. В.^{1,2}, Микушкин А. Ю.^{1,2}

УДК 662.215.12

¹Россия, ОИВТ РАН

²МГТУ им. Баумана

grigorij-bivol@yandex.ru

golovastov@yandex.ru

nota17@yandex.ru

1. Введение

Получение детонационной волны целесообразно для создания устройств, использующих импульсное воздействие рабочего тела на поверхность. Такими устройствами могут оказаться системы дробления, сжигания, напыления, а также двигательные системы или эжекторные насосы. При импульсном воздействии термодинамические параметры рабочего тела могут значительно превышать по величине параметры при стационарном воздействии. Так например, воздействие детонационной волной характеризуется кратковременным ростом давления до $P/P_0 = 20-30$ в течение 1-10 мкс ($P_0 = 101325$ Па), высокой скоростью потока газа 1000-1500 м/с за фронтом волны и скачком температуры до 2000-3000 К. Длительность фазы сжатия, как правило, не превышает 100 мкс. Однако, термодинамические и кинетические параметры, которые достигаются за фронтом детонационной волны, оказываются достаточными для выполнения той или иной задачи.

Получение непрерывной стоячей волны детонации является крайне сложной технической и научной задачей в силу того, что фронт детонационной волны представляет собой трехмерную ячеистую структуру. Размер ячеек и их поперечные скорости распространения вдоль поверхности фронта зависят от природы газа, от размеров и геометрии химического реактора, начальных и граничных условий, которые могут значительно изменяться в процессе работы реактора. С другой стороны, организация импульсного детонационного горения не требует специальных технических конструкций. За исключением создания импульсно периодической подачи газа в камеру сгорания и системы инициирования детонации.

Максимальные значения давления и температуры на фронте детонационной волны достигаются в момент формирования детонации вследствие непрерывного ускорения фронта пламени и перехода горения в детонацию. Сразу после момента возникновения детонации, фронт детонации движется по предварительно поджатой топливной смеси. Из-за этого скорость волны превышает скорость стационарного распространения детонации на 500-1500 м/с в зависимости от природы газа. Превышение скорости приводит к повышению пикового давления до $P/P_0 = 40-50$ и температуры до 4000 К.

Расстояние от места инициирования горения до того места, где происходит формирование детонации, называется преддетонационным расстоянием. На рис. 1 представлена $x-t$ -диаграмма формирования перехода горения в детонацию. В силу газодинамических неустойчивостей и нестационарного ускорения фронта пламени это расстояние может незначительно изменяться от цикла к циклу. Однако, в пределах одного конкретного устройства это изменение преддетонационного расстояния может оказаться критическим и привести к некорректной работе устройства.

Преддетонационное расстояние может быть эффективно установлено оптимальной геометрией химического реактора. Рассматриваемый нами принцип геометрии заключается в размещении конической секции в конце камеры сгорания. При движении волн сжатия в конической секции происходит интерференция волн сжатия. Сложение волн сжатия приводит к дополнительному повышению давления и, следовательно, к повышению температуры до температуры самовоспламенения топливной смеси. Из-за высокого давления воспламенившаяся смесь создает взрывную волну. Созданная волна, аналогично пересжатой детонации, имеет термодинамические параметры, значительно превышающие параметры стационарной детонации. На рис. 2 схематически представлена динамика волн сжатия в конической секции.

Для достижения максимального эффекта от конической секции перед конической секцией необходимо создать нестационарный двойной разрыв детонационной волны на волну сжатия и фронт пламени. Это обусловлено тем, что движение стационарной детонационной волны в коническом сечении мало отличается от движения детонационной волны в канале постоянного сечения.

Режим многоступенчатого формирования детонации исследован в работах [1] в движущейся и неподвижной газовых смесях. Влияние конуса на переотражение ударной волны и формирование детонации было исследовано в работе [2]. Результаты исследования дифракции приведены в работе [3,4]. Один из примеров использования детонации для напыления приведен в работе [5].

Наиболее распространенным топливом для практических применений является метан. В отличие от водорода в продуктах сгорания образуется меньше паров воды, что может оказывать влияние на аппаратуру и долговечность оборудования. Также можно использовать углеводороды более высокого порядка: пропан, бутан, пропилен и т.д.

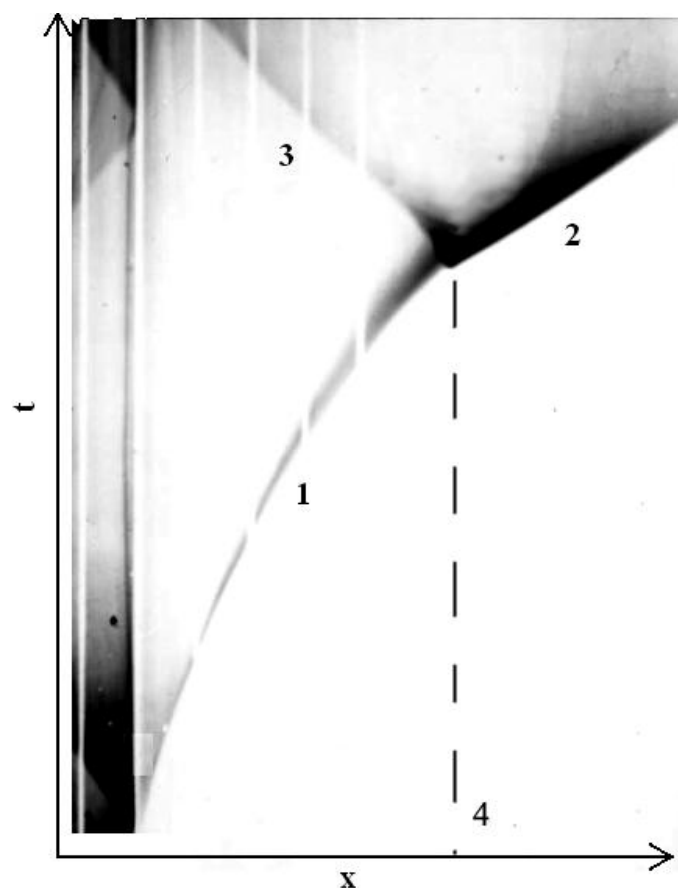


Рис. 1. X-t-диаграмма распространения фронта пламени и возникновения детонации в одномерном канале. 1 – ускоряющееся пламя, 2 – детонационная волна, 3 – ретонационная волна, 4 – преддетонационное расстояние

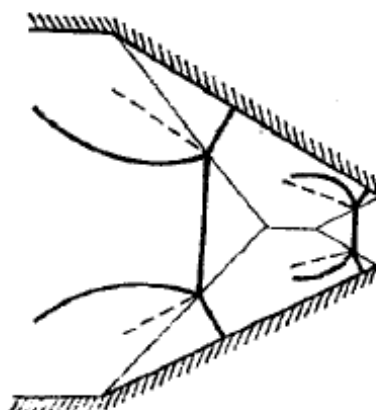


Рис. 2. Переотражение ударной волны в конусе

При использовании метана наилучшим окислителем является кислород. Недостатком воздуха является то, что в метано-воздушной смеси ширина детонационной ячейки

составляет 300 мм. Это делает метан трудно детонируемым в смеси с воздухом в устройствах, размеры которого много меньше указанных 300 мм.

Однако добиться нестационарного двойного разрыва в стехиометрической метано-кислородной смеси крайне сложно из-за малого размера детонационной ячейки 3 мм. Для получения нестационарного разрыва необходимо добиться того, чтобы размер детонационной ячейки соответствовал диаметру камеры сгорания. Таким образом, для каналов переменного сечения необходимо подбирать топливную смесь таким образом, чтобы размер детонационной ячейки смеси был немного меньше диаметра канала. Оптимальное отношение диаметра канала к размеру ячейки составляет 2-5.

Работы по влиянию азота на размер ячейки [6] показывают, что добавление даже небольшого количества азота сильно меняет размер ячейки.

Целью данной работы было определение параметров детонационной волны в канале переменного сечения в метано-кислородной смеси. Исследовалось влияние примесей азота на размер ячейки и на скорость и давление детонационной волны.

2. Экспериментальная установка

На рис. 3 представлен эскиз камеры сгорания переменного сечения.

Детонационная камера сгорания переменного сечения состояла из нескольких секций. В секции формирования детонационной волны (формирующая секция ФС) происходило воспламенение горючей смеси. После этого фронт пламени ускорялся до формирования детонации. Датчики давления, расположенные на выходе из ФС, регистрировали профиль детонационной волны и ее скорость. Расстояние между датчиками давления составляло 100 мм. Длина ФС составляла 1200 мм, диаметр 16 мм.

После формирования детонационная волна переходила в U-образную секцию (УС). Эта секция предназначалась для создания стационарной волны детонации с параметрами детонации Чепмена-Жуге. Длина УС составляла 400 мм, диаметр 21 мм.

Нестационарный двойной распад осуществлялся в измерительной секции (ИС) большего диаметра. Датчики давления, расположенные вдоль оси ИС, и фотодиоды ФД-256, соединенные с ИС оптическим проводом, регистрировали движение детонации либо комплекса волны сжатия и фронта пламени. Расстояние между датчиками давления составляло 60 мм. Оптопровод находился в одном сечении с датчиками давления. Длина ИС составляла 400 мм, диаметр 36 мм.

На выходе из ИС располагалась выходная секция с коническим сужением (выходная секция ВС). В проводимых нами экспериментах угол схождения равнялся 3° . Длина ВС составляла 300 мм, диаметр 21 мм.

ВС имела открытый конец. Так что начальное давление внутри камеры сгорания перед каждым экспериментом равнялось атмосферному давлению. Начальная температура равнялась температуре окружающего воздуха 300 К.

Для измерения давления использовались динамические пьезоэлектрические датчики РСВ.

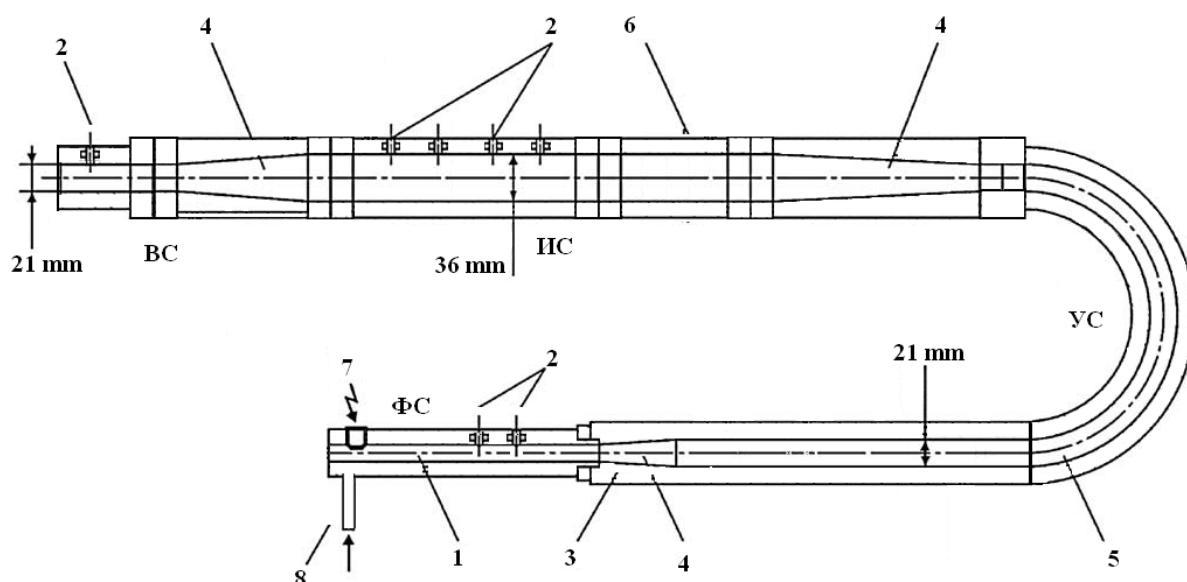


Рис. 3. Схема установки. 1 – формирующая секция, 2 – датчики давления и светимости, 3 – рубашка охлаждения, 4 – конусы, 5 – U-образная секция, 6 – измерительная секция, 7 – свеча зажигания, 8 – магистрали с топливом и окислителем.

Использовалась заранее приготовленная смесь метана с кислородом и воздухом. Смесь приготавливалась по парциальным давлениям в баллоне объемом 40 л. Полное давление в баллоне составляло $P/P_0 = 5-8$. Смесь выдерживалась не менее 24 часов. Подача горючей смеси в камеру сгорания осуществлялась через вентильный кран. Качество смеси в камере сгорания не регистрировалось, при этом осуществлялось двукратное переполнение камеры сгорания горючей смесью. Перед инициированием кран перекрывался.

Воспламенение горючей смеси производилось при помощи искрового разряда в начале ФС через автомобильную катушку зажигания. Энергия искрового разряда не превышала 0,1 Дж.

Для определения размера детонационной ячейки использовалась медная фольга, покрытая сажей.

3. Экспериментальные данные

Используемые смеси метана с кислородом и воздухом представлены в табл. 1.

Таблица 1. Используемые смеси и их параметры. ER – коэффициент мольного избытка горючего; CH_4 – объемная концентрация метана, O_2 – объемная концентрация кислорода, N_2 – объемная концентрация азота, γ – показатель адиабаты, $C_{зв}$ – скорость звука, λ – измеренная ширина детонационной ячейки

ER	CH_4 , %(mol)	O_2 , %(mol)	N_2 , %(mol)	γ	$C_{зв}$, м/с	λ , мм
1	33	67	0	1,37	343	3
0,85	21	50	29	1,38	338	8
0,75	15	40	45	1,39	336	—
1,45	42	58	0	1,37	352	6
2,35	54	46	0	1,36	365	—

Коэффициент мольного избытка горючего (equivalence ratio ER) изменялся от 0.75 до 2.35.

На рис. 4 представлены осциллограммы датчиков давления и фотодиодов в ФС, ИС и ВС для стехиометрической смеси метана с кислородом ($ER=1$). Также на рисунке 4 показана x - t -диаграмма движения детонационной волны в этих секциях.

Два датчика давления, расположенные в ФС, регистрируют движение сформированной детонационной волны. Скорость волны составляла 2200 м/с. Давление на фронте волны составляло $P/P_0 = 20$. Таким образом, в УС распространялась стационарная детонационная волна, в ИС также входила детонационная волна. Датчики давления, расположенные в ИС, регистрировали постоянную скорость распространения детонационной волны, равную 2500 м/с. Фотодиоды, расположенные в одном сечении с датчиками давления, не регистрировали замедления фронта пламени относительно фронта ударной волны. Таким образом, комплекс ударная волна-фронт пламени представлял собой устойчивую детонационную волну вдоль всей ИС. Распада детонационной волны не происходило.

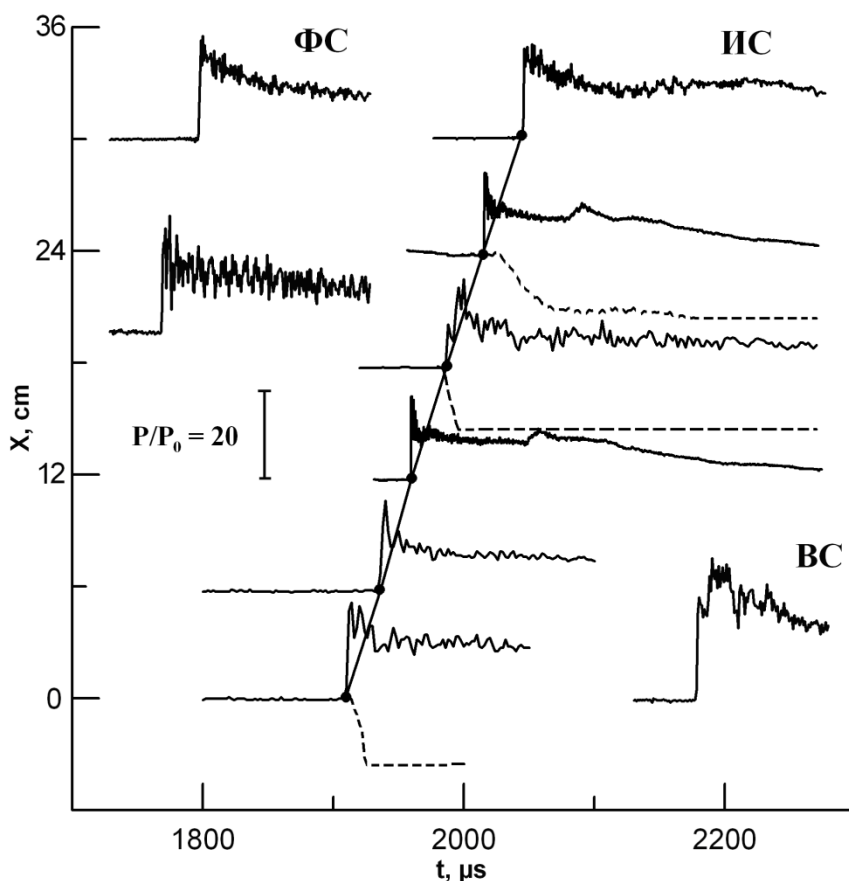


Рис. 4. Осциллограммы давления и свечения в трех секциях камеры сгорания, x - t -диаграмма движения детонационной волны. ФС – динамика в формирующей секции, ИС – динамика в измерительной секции, ВС – динамика в выходной секции. Сплошные линии – осциллограммы давления, штриховые линии – осциллограммы свечения

На рис. 5 представлен след, оставленный ячеистым фронтом детонационной волны при прохождении вдоль ИС. Измерения показали, что ширина детонационной ячейки при $ER=1$ составила 4 мм.

При переходе детонационной волны из ИС в ВС наблюдалось повышение давления на фронте до $P/P_0 = 28$, вызванное интерференцией детонационной волны в конической секции.

При уменьшении ER до 0,85 датчики давления в ФС регистрировали не прохождение детонационной волны, а момент ее формирования (рис. 6). Первый датчик показывает профиль волны сжатия, который состоит из суперпозиции слабых волн сжатия, следующих друг за другом. За головной волной сжатия следует явно выделяемый пик давления.

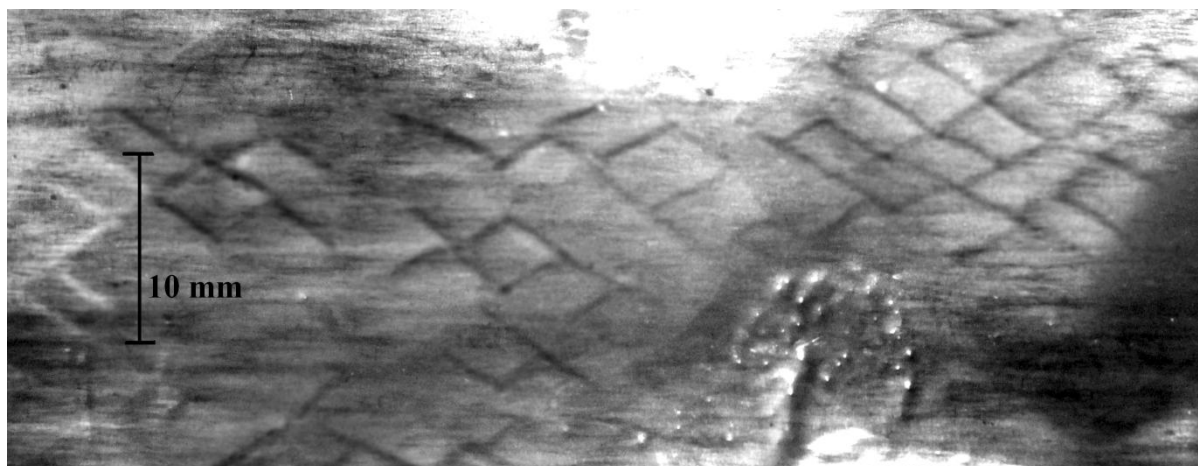


Рис. 5. Фотография закопченной фольги, вынутой из измерительной секции. Видна ячеистая структура детонации

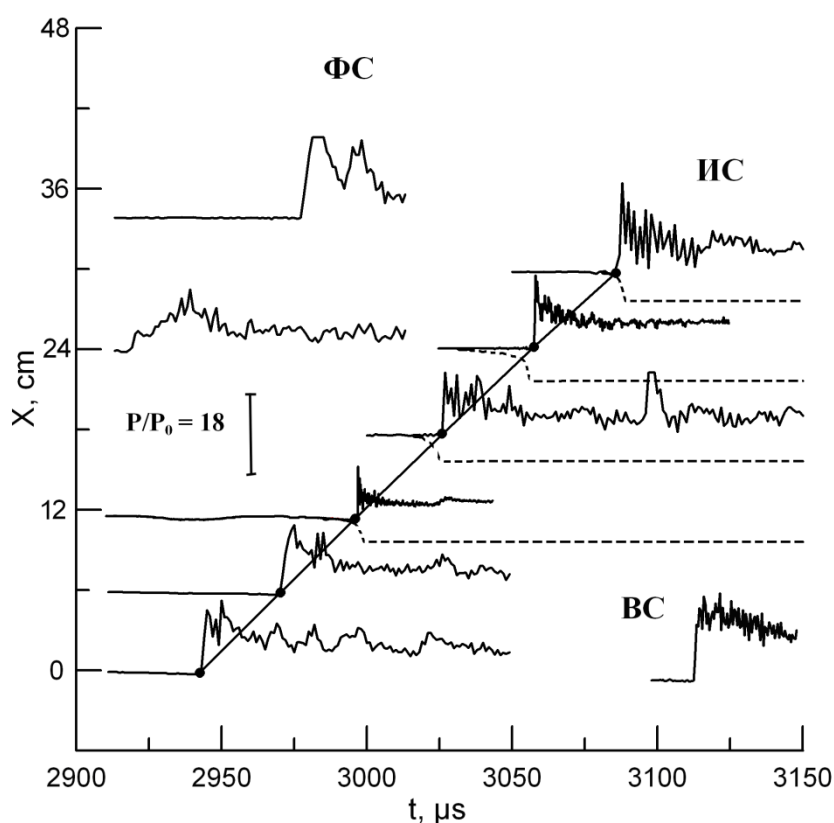


Рис. 6. Осциллограммы давления и свечения в трех секциях камеры сгорания, X-t-диаграмма движения детонационной волны. ФС – динамика в формирующей секции, ИС – динамика в измерительной секции, ВС – динамика в выходной секции. Сплошные линии – осциллограммы давления, штриховые линии – осциллограммы свечения

Второй датчик давления регистрирует уже сформированный профиль детонационной волны. Так что можно предположить, что формирование детонации произошло между первым и вторым датчиками давления в ФС. Скорость между пиками давления, регистрируемыми этими двумя датчиками, составляет 1800 м/с. Эта скорость меньше скорости, получаемой при $ER=1$, как и следовало ожидать. Давление на фронте волны составляло $P/P_0=18$.

Таким образом, в УС входила пересжатая детонационная волна. Однако после прохождения УС стационарная детонационная волна входила в ИС. Датчики давления, расположенные в измерительной секции, регистрировали постоянную скорость распространения детонационной волны, равную 2050 м/с. Фотодиоды, расположенные в одном сечении с датчиками давления, не регистрировали замедления фронта пламени относительно фронта ударной волны. Таким образом, комплекс ударная волна-фронт пламени представлял собой устойчивую детонационную волну вдоль всей ИС. Распада детонационной волны не происходило.

Измерение ширины детонационной ячейки методом закопченной фольги показало значение 8 мм при $ER=0,85$.

При переходе детонационной волны из ИС в ВС наблюдалось повышение давления на фронте до $P/P_0= 22$.

При повышении ER до значения 1,45 датчики давления, расположенные в конце ФС, регистрировали увеличение скорости детонации до 3100 м/с. X-t-диаграмма подобна диаграмме, представленной на рис. 4. Повышение скорости детонации обусловлено повышением скорости звука в непрореагировавшей смеси. Скорость звука увеличивалась с 343 при $ER=1$ до 352 при $ER=1,45$. Давление на фронте волны также увеличивалось и составляло $P/P_0= 25$.

Таким образом, на входе в ИС подходила уже сформированная детонационная волна. Датчики давления, расположенные в измерительной секции, регистрировали постоянную скорость распространения детонационной волны, равную 2600 м/с. Фотодиоды, расположенные в одном сечении с датчиками давления, не регистрировали отставания фронта пламени от фронта ударной волны. Т.е. комплекс ударная волна-фронт пламени представлял собой устойчивый комплекс, распада детонационной волны не происходило.

При переходе детонационной волны из измерительной секции в ВС наблюдалось повышение давления на фронте до $P/P_0= 28$.

Измерение ширины детонационной ячейки методом закопченной фольги показало значение 6 мм при $ER=1,45$.

Более значительное снижение ER до 0,75 или повышение до 2,35 не приводило к формированию детонации в ФС. Более того, формирование детонации не происходило и в УС. Таким образом, в ИС датчики давления и свечения регистрировали движение впереди идущей ударной волны и следующего за ним фронта пламени (рис. 7).

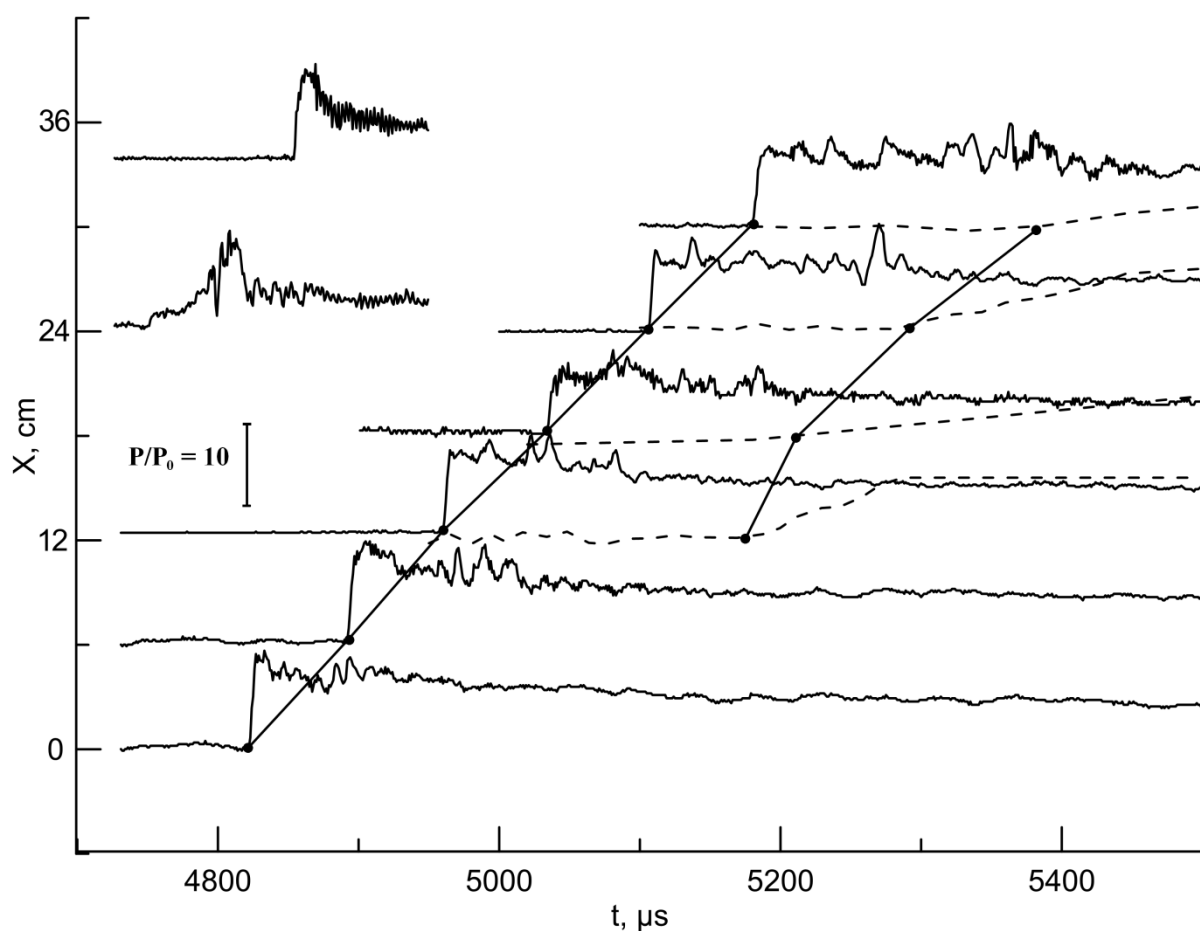


Рис. 7. Осциллограммы давления и свечения в трех секциях камеры сгорания, X-t-диаграмма движения детонационной волны. ФС – динамика в формирующей секции, ИС – динамика в измерительной секции, ВС – динамика в выходной секции. Сплошные линии – осциллограммы давления, штриховые линии – осциллограммы свечения

Скорость волны составляла 1000 м/с. Давление на фронте волны составляло 10 атм. Датчики давления, расположенные в измерительной секции, регистрировали постоянную скорость распространения ударной волны, равную 900 м/с. Фотодиоды, расположенные в одном сечении с датчиками давления, регистрировали значительное отставание фронта пламени от фронта ударной волны. Это связано с тем, что в этом случае детонационная ячейка стала сравнима с размером канала.

При переходе детонационной волны из измерительной секции в ВС наблюдалось повышение давления на фронте до $P/P_0 = 22$. При этом наблюдалось отражения ударной волны от конической секции и формирование отраженной ударной волны.

Выводы

Экспериментально изучены параметры детонационных волн, распространяющихся в канале переменного сечения в метано-кислородных смесях.

Определены скорости и давления на фронте детонационной волны в зависимости от состав смеси, в том числе в присутствии азота. Параметры волны соответствовали пара-

метрам стационарной детонации Чепмена-Жуге при соотношении, близком к стехиометрическому.

Определены размеры детонационных ячеек с помощью закопченной фольги, установленной внутри канала. Размер детонационных ячеек составлял для различных смесей от 4 мм до 8 мм. При большем увеличении размера ячейки формирование детонации не происходило.

Благодарность

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ 13-08-01227, президиума РАН «Горение и взрыв», Минобрнауки СП-1782.2012.1.

Список литературы

1. Baklanov D.I., Gvozdeva L.G., Scherbak N.B. Formation of high-speed gas flow at combustion in the regime of multi-step detonation // In: Gaseous and Heterogeneous Detonations: Science to Applications / Roy G.D., Frolov S.M., Semenov N.N., Kailasanath K., Smirnov N.N. (eds.). Moscow, ENAS Publ., 1999. P. 141-152.
2. Khasainov B., Presles H.-N., Desbordes D., Demontis P., Vidal P. Detonation diffraction from circular tubes to cones // Shock Waves. 2005. Vol. 14, no. 3. P. 187-192.
3. Bartma F., Schroder K. The Diffraction of a Plane Detonation Wave at a Convex Corner // Combustion and Flame. 1986. Vol. 66. P. 237-248.
4. Brown C.J., Thomas G.O. Experimental studies of ignition and transition to detonation induced by the reflection and diffraction of shock waves // Shock Waves. 2000. Vol. 10, no. 1. P. 23-32.
5. Николаев Ю.А., Васильев А.А., Ульяницкий В.Ю. Газовая детонация и ее применение в технике и технологиях (обзор) // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 4. С. 22-54.
6. Akbar R, Kaneshige M.J., Schultz E., Shepherd J.E. Detonations in H₂-N₂O-CH₄-NH₃-O₂-N₂ mixtures. Technical Report FM97-3. Explosion Dynamics Laboratory, California Institute of Technology, 1997.

Detonation wave parameters in a variable cross section channel in gas mixture of methane with oxygen and nitrogen

05, May 2014

DOI: 10.7463/0614.0712204

G.Y. Bivol¹, V.S. Golovastov^{1,2}, Mikushkin A.Yu.^{1,2}¹Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, 125412, Moscow, Russian Federation²Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federationgrigorij-bivol@yandex.rugolovastov@yandex.runotna17@yandex.ru

Propagation of the detonation wave in gas mixtures of methane with oxygen in a channel of variable cross section was studied experimentally. To conduct these investigations a special detonation combustion chamber comprising sections of various diameters has been designed. In the section of detonation wave formation a combustible mixture was ignited. After that, a flame front accelerated till the formation of detonation. At the exit from the combustion chamber there was an outlet conical section. In conducted experiments the toe-in angle was equal to 3 °. The combustion chamber was open-ended. So an initial pressure inside the combustion chamber prior to each experiment was equal to the atmospheric pressure. The initial temperature was ambient one of 300 K. As a diagnostics, piezoelectric sensors of pressure and photo diodes were used.

Detonation initiation was accomplished by spark gap. For this pulse generator I-1 was used. Spark energy did not exceed 0.1 J and was much lower than the energy of the direct initiation of detonation.

Deflagration-to-detonation transition was occurred. A composition of the mixtures was selected in such a way that the detonation cell width was several times smaller than the diameter of the channel. The mixture was composed by the partial pressures of methane, oxygen, and nitrogen and was kept in the 40 l tank within 24 hours under 5-8 atm. pressure. Возникновение детонации возникало вследствие перехода горения в детонацию

The aim of this study was to determine the parameters of a detonation wave in a channel of variable cross section in the methane-oxygen mixture. The influence of nitrogen impurities on the cell size and the speed and pressure of the detonation wave was investigated.

The waves velocities and peak pressures at the front of the detonation wave were measured depending on composition, including the presence of nitrogen. The sizes of the detonation cells were measured using smoked foil mounted inside the channel.

The effect of the interference of the shock waves in a conical section was studied.

Diagrams of the shock waves, flame fronts, and detonation waves in the combustion chamber depending on the mixture composition are presented. The paper gives data on some compositions of mixtures.

Publications with keywords: [detonation](#), [methane](#), [wave split](#)

Publications with words: [detonation](#), [methane](#), [wave split](#)

References

1. Baklanov D.I., Gvozdeva L.G., Scherbak N.B. Formation of high-speed gas flow at combustion in the regime of multi-step detonation. In: Roy G.D., Frolov S.M., Semenov N.N., Kailasanath K., Smirnov N.N., eds. *Gaseous and Heterogeneous Detonations: Science to Applications*. Moscow, ENAS Publ., 1999, pp. 141-152.
2. Khasainov B., Presles H.-N., Desbordes D., Demontis P., Vidal P. Detonation diffraction from circular tubes to cones. *Shock Waves*, 2005, vol. 14, no. 3, pp. 187-192.
3. Bartlma F., Schroder K. The Diffraction of a Plane Detonation Wave at a Convex Corner. *Combustion and Flame*, 1986, vol. 66, pp. 237-248.
4. Brown C.J., Thomas G.O. Experimental studies of ignition and transition to detonation induced by the reflection and diffraction of shock waves. *Shock Waves*, 2000, vol. 10, no. 1, pp. 23-32.
5. Nikolaev Yu.A., Vasil'ev A.A., Ul'yanitskiy V.Yu. [Gas Detonation and its Application in Engineering and Technologies (Review)]. *Fizika gorennya i vzryva*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 22-54. (English translation: *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2003, vol. 39, iss. 4, pp. 382-410. DOI: [10.1023/A:1024726619703](https://doi.org/10.1023/A:1024726619703)).
6. Akbar R, Kaneshige M.J., Schultz E., Shepherd J.E. *Detonations in H2-N2O-CH4-NH3-O2-N2 mixtures*. Technical Report FM97-3. Explosion Dynamics Laboratory, California Institute of Technology, 1997.