

## Закономерности форкамерного инициирования газовой детонации в осесимметричном канале

Головастов С.В.

### АБСТРАКТ

Экспериментально исследован процесс перехода горения в детонацию в канале субкритического диаметра в пропано-бутано-кислородных и ацетилено-кислородных смесях. Иницирование детонации осуществлялось за счет сжигания смеси в форкамере, пристыкованной к торцу канала диаметром 3 мм. Определены размеры форкамеры и состав топливной смеси, при которых осуществляется либо переход горения в детонацию в канале, либо прямое инициирование на входе в узкий канал. Проведена классификация воздействия форкамерного способа инициирования на эволюцию фронта пламени в узком канале.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Она состояла из форкамеры (PC), присоединенного к ней узкого открытого канала, системы откачки (2), системы наполнения смесью (3), измерительного манометра (1), системы воспламенения с энергией искры 0.1Дж (SG) и измерительной системы. Форкамера и канал изготовлены из латуни. Внутренний диаметр канала составлял 3 мм, толщина стенок 7-8 мм. Длина канала равнялась 500 мм, т.е. 166 калибров. Диаметр форкамеры мог задаваться равным 10, 16 или 20 мм. Минимальная толщина стенок форкамеры составляла 8 мм, максимальная – 15 мм. Длина форкамеры варьировалась в диапазоне 8-34 мм. Для того, чтобы избежать влияния истечения продуктов сгорания из топливной магистрали на динамику горения в узком канале, выводы топливной магистрали и вакуумного насоса располагались у открытого конца канала.

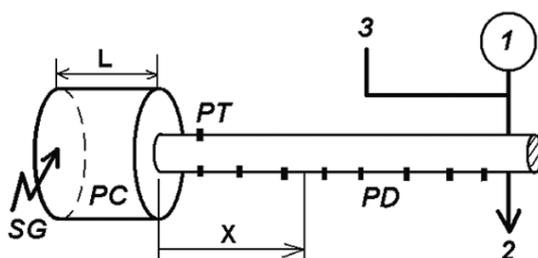


Рис.1. Схема экспериментального стенда. PC – форкамера, SG – искровой разрядник, PT – датчик давления, PD – фотодиоды, X – расстояние от начала канала, L – длина форкамеры, 1 – манометр, 2 – вакуумный насос, 3 – газовая смесь.

Детонационная смесь приготавливалась по парциальным давлениям в сосуде объемом 3 л. Перед каждым экспериментом форкамера и канал откачивались до давления 2 кПа. После этого происходило заполнение форкамеры и канала детонационноспособной смесью до избыточного давления, превышающего 1 атм. За 2-3 с. до воспламенения канал открывался, и давление в канале выравнивалось с атмосферным давлением.

Для измерения скорости фронта пламени использовались фотодиоды, установленные вдоль оси канала на боковой поверхности канала. Измерительная

система включала 12 фотодиодов ФД-256. Для измерения давления на входе в узкий канал использовался пьезоэлектрический датчик давления РСВ 113.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Влияние размеров форкамеры на граничные условия на входе в канал и на эволюцию скорости фронта пламени.

В данной главе приведены осциллограммы давления на входе в канал и эволюции скорости пламени вдоль оси канала для пропано-бутано-кислородной смеси с соотношением  $ER=0.9$ . При постоянном значении состава смеси изменялись длина и диаметр форкамеры. Среди всех полученных осциллограмм давления и эволюции скорости фронта пламени мы выделили три характерных случая. На рисунке 2 приведены осциллограммы датчика давления и эволюции скорости фронта пламени для следующих размеров форкамеры: диаметр/длина 10/7 mm, 20/8 mm и 10/20 mm.

При сгорании смеси в форкамере длиной 7 мм и диаметром 10 мм датчик давления в течение 40 мкс регистрирует незначительное повышение давления до 3 атм (рис. 2а). Повышение давления вызвано сложением акустических возмущений, создаваемых ускоряющимся фронтом пламени внутри форкамеры и на входе в канал. Скорость фронта пламени, регистрируемая фотодиодами в месте расположения датчика давления, равна 700 м/с. Одновременно с фронтом пламени датчик давления регистрирует пик давления 10 атм. Можно предполагать, что данный пик давления вызван выходом из форкамеры продуктов сгорания. В канале наблюдалось постепенное ускорение фронта пламени вдоль оси канала до момента формирования детонации. Преддетонационное расстояние составило 150 мм (50 калибров). Скорость стационарной детонации составила 2100-2300 м/с. Это значение соответствует значению стационарной скорости детонации для  $ER=0.9$ .

Отсутствие регистрируемых ударных волн на входе в канал дает возможность предположить, что сгорание в форкамере при указанных размерах происходит без формирования ударных волн внутри форкамеры. Схематически процесс определенного здесь эффекта поджатия с помощью форкамеры и на начальном участке канала представлен на рисунке 3а. При сгорании смеси в форкамере длиной 8 мм и диаметром 20 мм датчик давления в течение 50 мкс регистрирует незначительное повышение давления до 3 атм, аналогично предыдущему случаю (рис. 2б). Повышение давления вызвано сложением акустических возмущений, создаваемых ускоряющимся фронтом пламени внутри форкамеры и на входе в канал. Скорость фронта пламени, регистрируемая фотодиодами в месте расположения датчика давления, равна 150 м/с.

Одновременно с фронтом пламени датчик давления регистрирует пик давления 15 атм. Можно предполагать, что данный пик давления вызван выходом из форкамеры продуктов сгорания. Через 150 мкс после первого пика давления датчик давления регистрирует второй пик давления. В течение этого промежутка времени датчик давления регистрирует постоянный рост давления. Это также может быть обусловлено продолжительным истечением продуктов сгорания из форкамеры.

Аналогично первому случаю, в канале наблюдалось постепенное ускорение фронта пламени вдоль оси канала до момента формирования детонации. Преддетонационное расстояние составило 150-160 мм (50-53 калибра). Скорость стационарной детонации составила 2200-2300 м/с. Это значение соответствует значению стационарной скорости детонации для  $ER=0.9$ .

На первом этапе горения данный случай аналогичен предыдущему случаю. Отсутствие регистрируемых ударных волн на входе в канал дает возможность предположить, что сгорание в форкамере при указанных размерах происходит без

формирования ударных волн внутри форкамеры. Так как помимо основного направления вдоль оси канала продукты сгорания расширяются в радиальном направлении в форкамере, скорость истечения продуктов сгорания существенно снижается. В данном случае скорость истечения продуктов сгорания составила 100-150 м/с, в отличие от 700 м/с в первом случае.

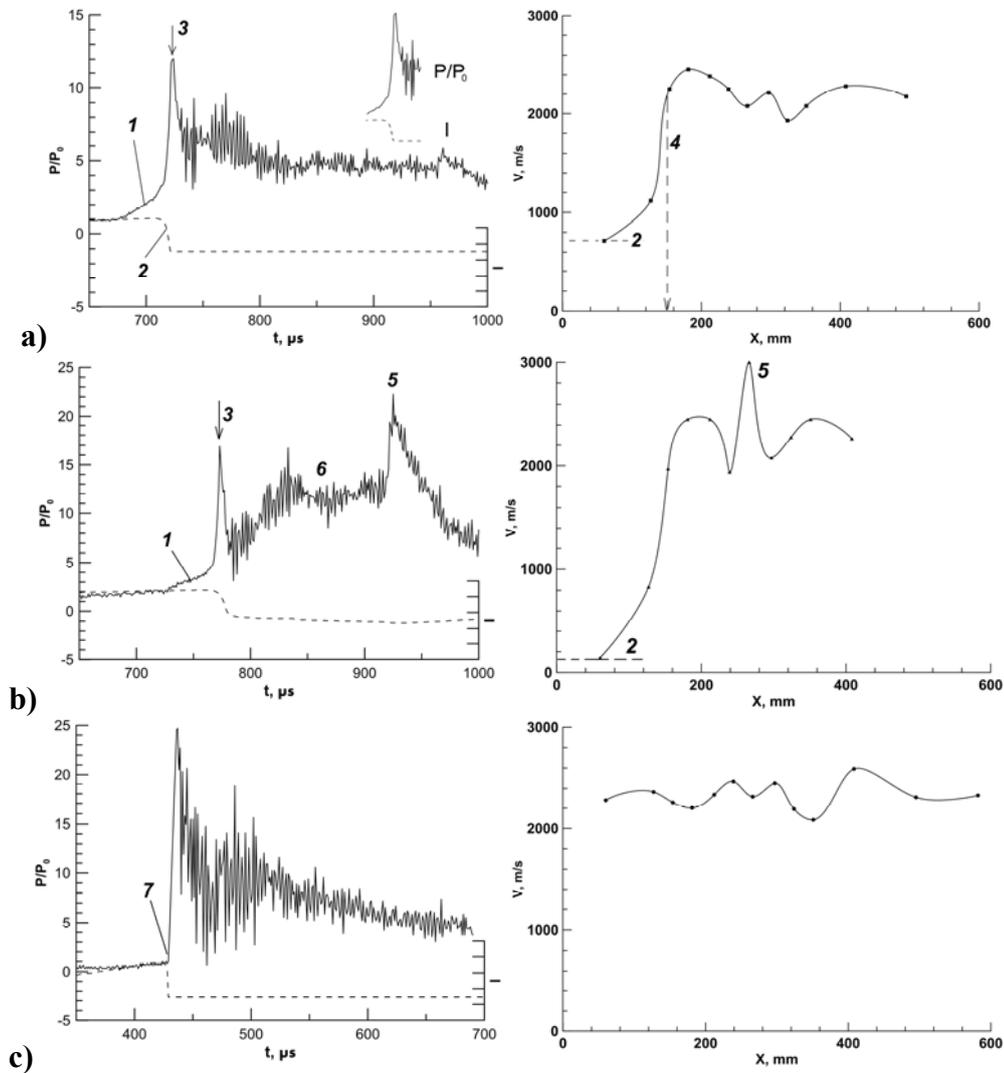


Рис.2. Показания датчика давления ( $P/P_0$ ) и фотодиода ( $I$ , отн. ед.) в положении 10 калибров от начала канала. Скорости фронта пламени в канале. Диаметр/длина форкамеры: а, 10/7 мм; б, 20/8 мм; с, 10/20 мм. 1 – повышение давления вследствие истечения продуктов горения, 2 – фронт пламени и скорость фронта пламени, 3 – повышение давления на фронте пламени, 4 – преддетонационное расстояние, 5 – повышение скорости вследствие волны сжатия, 6 – стационарное истечение продуктов их форкамеры, 7 – детонационная волна.

Однако, в отличие от первого случая, фронт горения распространяется также и в радиальном направлении в форкамере и достигает стенок через определенное время. Схематически предполагаемый процесс распространения горения в подобной форкамере и на начальном участке канала представлен на рисунке 3б. Ускоряющийся фронт пламени генерирует волны сжатия. При отражении от стенок форкамеры волны сжатия объединяются в центральной части форкамеры в один общий фронт волны.

Этот фронт волны регистрируется датчиком давления на входе в узкий канал. Затем, на расстоянии 260 мм от входа в узкий канал наблюдалось резкое увеличение скорости пламени, вызванное указанным вторичным пиком давления. Скорость фронта пламени достигала 3000 м/с, что значительно превышает скорость стационарной детонации 2100 м/с.

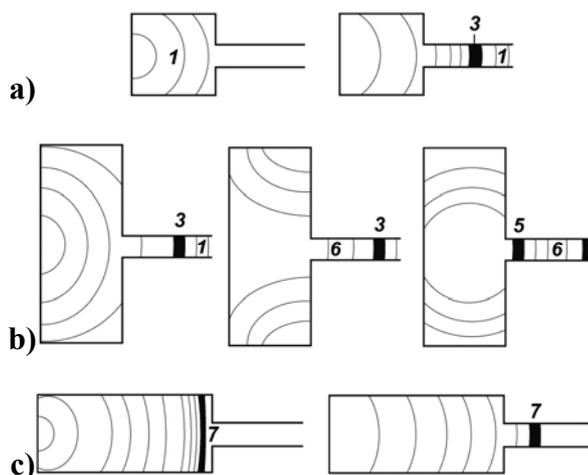


Рис.3. Схема движения волн сжатия внутри форкамеры. Диаметр/длина форкамеры: а, 10/7 мм; б, 20/8 мм; в, 10/20 мм. 1 – волны сжатия, 3 – повышение давления на фронте пламени, 5 – повышение скорости вследствие волны сжатия, 7 – детонационная волна.

При сгорании смеси в форкамере длиной 20 мм и диаметром 10 мм датчик давления регистрирует резкое повышение давления до 20 атм (рис. 2в). Профиль давления имеет типичный профиль детонационной волны. Скорость фронта пламени на входе в канал волны равнялась 2250 м/с и соответствовала скорости стационарной детонации. На всем протяжении канала скорость фронта пламени практически не изменялась и составляла 2100-2200 м/с. Таким образом, преддетонационное расстояние было гораздо меньше длины первой измерительной базы.

В форкамере длиной 20 мм успевает возникнуть волна сжатия. Ускоряющийся фронт пламени может перейти в детонацию даже в форкамере. Поэтому на входе в узкий канал можно наблюдать уже сформированную детонационную волну. Схематически предполагаемый процесс распространения горения в подобной форкамере и на начальном участке канала представлен на рисунке 3в.

В отличие от предыдущих случаев, когда регистрировался выброс продуктов сгорания из форкамеры в узкий канал, в данном случае воспламенение смеси в канале осуществлялось за счет детонации. В данном случае сгорание детонационноспособной смеси в форкамере можно рассматривать как прямое инициирование детонации.

На основании приведенных выше экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что в зависимости от размеров форкамеры динамика фронта пламени и ударных волн в канале может развиваться по-разному: переход горения в детонацию за счет истекающих продуктов сгорания, формирование детонации за счет волны сжатия или прямое инициирование детонации. Для используемой пропано-бутано-кислородной смеси возможно определить предельные линейные размеры форкамеры: длину  $L$  и радиус  $D/2$ . В том случае, когда длина и радиус не превышает предельные размеры форкамеры, сгорания топливной смеси можно рассматривать как эффект поджатия. Для рассматриваемой смеси такие размеры можно задать равными  $x^*=8$  мм,

$r'=5$  mm. Если размеры форкамеры будут превышать указанные размеры, то сгорание смеси в форкамере будет сопровождаться наличием волн сжатия и ударных волн (Таблица 1).

Таб.1. Максимальные радиус и длина форкамеры, при которых формирование детонации осуществляется за счет истечения продуктов горения.

Смесь	ER	D/2, мм	L, мм	Смесь	ER	D/2, мм	L, мм
пропано-бутано-кислородная смесь	0.30	10	<b>37</b>	ацетилено-кислородная смесь	0.20	10	<b>20</b>
	0.40	10	<b>20</b>		0.23	10	<b>20</b>
	0.65	<b>10</b>	8		0.28	<b>10</b>	8
	0.90	5	<b>7</b>		0.48	5	<b>7</b>

### 3.2. Влияние ER на динамику фронта пламени.

Изменяя соотношение между компонентами детонационноспособной смеси, можно попытаться варьировать значение предельных размеров форкамеры. Это может быть достигнуто за счет изменения периода индукции и скорости звука смеси. Также это может быть достигнуто за счет изменения величины энергии, выделяющейся в объеме форкамеры. Для примера приведены результаты для форкамеры длиной 10 мм и диаметром 20 мм, а также для трех составов пропано-бутано-кислородной смеси: ER = 0.9; ER = 0.65 и ER = 0.4.

При использовании форкамеры указанных размеров наблюдалась принципиально разная эволюция скорости фронта пламени для разного состава смесей (рис. 4). При ER = 0.9 наблюдалось два выраженных максимума скорости. Эти максимумы объяснялись ранее наличием первичной волны сжатия и следующей за ней ударной волны, возникшей вследствие догорания смеси и формированием отраженной от краев форкамеры ударной волны. Преддетонационное расстояние составляло 150 мм. При уменьшении ER до 0,65 наблюдалось только монотонное повышение скорости фронта пламени до формирования детонации.

Отсутствие дополнительного максимума в значении скорости фронта пламени может быть объяснено тем, что в форкамере не возникают отраженные от краев форкамеры волны сжатия. Уменьшение ER могло привести к увеличению периода индукции смеси. А это, в свою очередь, могло привести к тому, что сгорание смеси в форкамере происходил эффект поджатия.

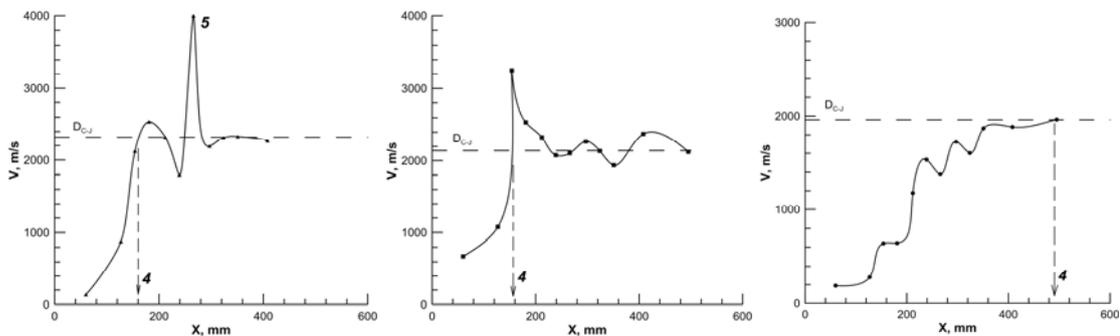


Рис.4. Зависимость скорости фронта пламени вдоль оси канала для форкамеры диаметром 20 мм и длиной 8 мм. а, ER=0.9; б, ER=0.65; в, ER=0.4. 4 – преддетонационное расстояние, 5 – повышение скорости вследствие волны сжатия.

Преддетонационное расстояние для  $ER = 0.65$  не изменилось по сравнению с  $ER = 0.9$ . Т.е. полезная работа, совершенная продуктами сгорания для формирования детонации, при  $ER = 0.65$  оказалась сравнима с аналогичной работой при  $ER = 0.9$ . Это может быть объяснено тем, что при  $ER = 0.9$  скорость распространения фронта пламени в форкамере сравнима со скоростью распространения слабых возмущений. При этом не выполняется условие поджатия. Поэтому распространение фронта пламени носит трехмерный характер. Таким образом, значительная доля кинетической энергии продуктов сгорания распространяется в радиальном направлении.

Напротив, при меньших  $ER$  скорость распространения слабых возмущений превышает скорость распространения фронта пламени. Поэтому сгорание в форкамере может быть рассмотрено как эффект поджатия. В радиальном направлении не формируются волны сжатия, и большая часть кинетической энергии продуктов сгорания распространяется в сторону канала. Это может объяснить численное сходство в величине преддетонационного расстояния.

Дальнейшее уменьшение  $ER$  до 0.4 не привело к принципиально отличной эволюции скорости фронта пламени относительно  $ER = 0.65$ . Наблюдалось монотонное увеличение скорости фронта пламени до значений детонации. Преддетонационное расстояние составляло 350 мм (117 калибров).

Таким образом, для значений  $ER$  не превышающих 0.65, сгорание в форкамере может быть рассмотрено как эффект поджатия. В двух последних случаях динамика движения фронта пламени в канале носила одинаковый характер.

На основании приведенных выше экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что для заданных размеров форкамеры можно определить такое соотношение между компонентами смеси, при котором динамика фронта пламени и ударных волн в канале может развиваться по одному из предложенных выше сценариев: переход горения в детонацию за счет истекающих продуктов сгорания, формирование детонации за счет волны сжатия или прямое инициирование детонации. Например, для форкамеры длиной 10 мм и диаметром 20 мм значение  $ER$  определено 0.65. А для форкамеры длиной 20 мм и диаметром 10 мм значение  $ER$  определено 0.4. Изменение «индукционного размера» вызвано, таким образом, влиянием состава смеси на период индукции.

### **3.3. Влияние горючего на инициирование детонации.**

В данной главе приведено качественное сравнение форкамерного инициирования детонации в пропано-бутано-кислородной смеси с инициированием детонации в ацетилено-кислородной смеси. В качестве примера, на рисунке 5 приведены осциллограммы давления и эволюции скорости фронта пламени в канале для двух смесей в форкамере длиной 20 мм и диаметром 10 мм. Выбрано такое  $ER$  для обеих смесей, при котором в форкамере происходил эффект поджатия при сгорании детонационноспособной смеси. Для пропано-бутано-кислородной смеси  $ER = 0.4$ , для ацетилено-кислородной смеси  $ER = 0.2$ .

На обеих осциллограммах давления наблюдаются в указанной последовательности: монотонное повышение давления, волна сжатия, следующий за первой волной сжатия комплекс из двух скачков уплотнения, понижение давления. Для обеих смесей скорость фронта пламени повышается немонотонно, наблюдается один локальный экстремум. После экстремума наблюдалось резкое ускорение фронта пламени до формирования пересжатой детонации. После формирования пересжатой детонации происходило снижение скорости фронта пламени до стационарного значения: в пропано-бутано-кислородной смеси скорость равнялась 2000 м/с, в ацетилено-кислородной смеси скорость равнялась 1900 м/с. Таким образом, для

приведенных двух смесей наблюдались качественно схожие осциллограммы давления на входе в канал и эволюция скорости фронта пламени в канале.

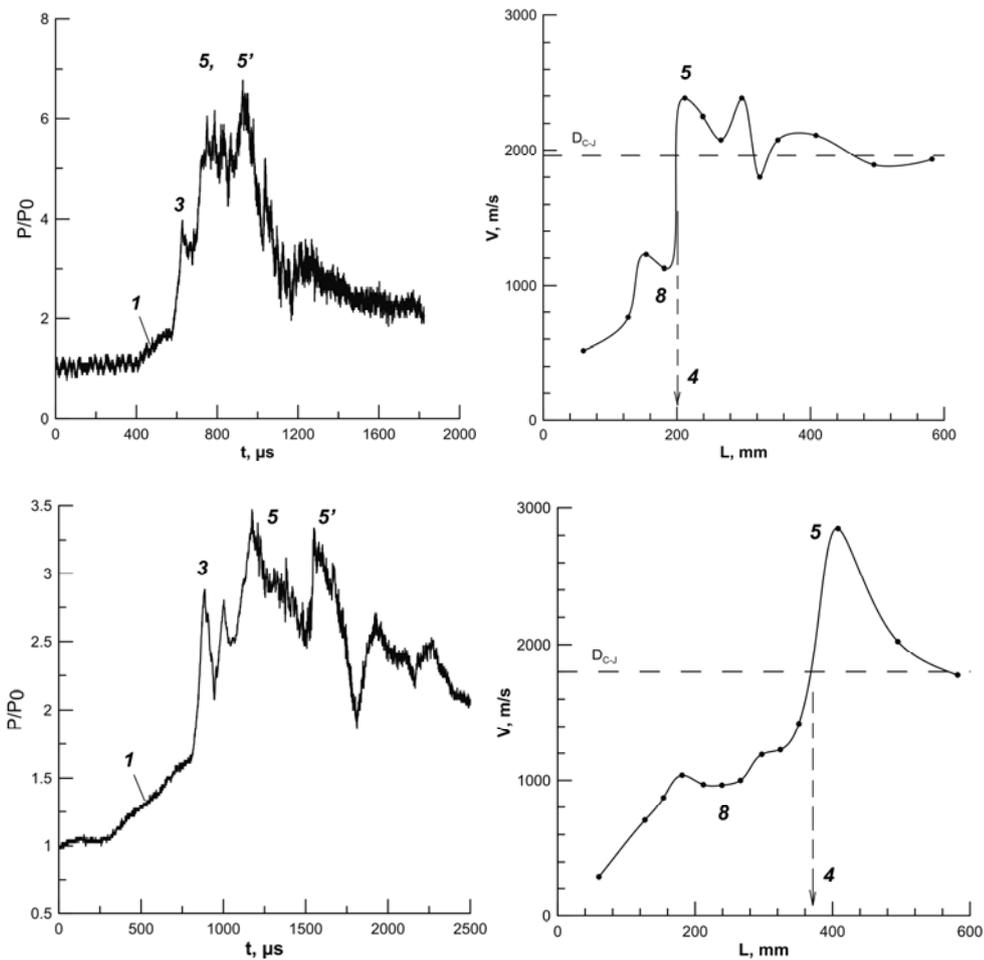


Рис.5. Сравнение двух профилей давления ( $P/P_0$ ) на расстоянии 10 калибров от начала канала и скорости фронта пламени для пропано-бутано-кислородной смеси и для ацетилено-кислородной смеси. Диаметр/длина форкамеры: 10/20 мм. 1 – повышение давления вследствие истечения продуктов горения, 3 – повышение давления на фронте пламени, 4 – преддетонационное расстояние, 5,5' – повышение скорости вследствие волны сжатия, 8 – локальный минимум скорости.

Количественное отличие в приведенном сравнении заключается в том, что повышение давления в форкамере при сжигании ацетилено-кислородной смеси при  $ER = 0.2$  происходило медленнее в 2 раза. Как следствие, это вызывало более медленное ускорение фронта пламени и увеличение преддетонационного расстояния до 400 мм (130 калибров) по сравнению с 200 мм (65 калибрами) в пропано-бутано-кислородной смеси.

Для того, чтобы сгорание ацетилена происходило в режиме эффекта поджатия, необходимо использовать более бедные смеси, чем в пропано-бутано-кислородной смеси. Такое сгорание в форкамере с указанными линейными размерами наблюдалось только при  $ER$ , не превышающим 0.2.

## 4. ОБСУЖДЕНИЯ

На основе приведенных выше результатов и рассуждений возможно выделить два предельных случая инициирования детонации в канале с помощью форкамеры: переход горения в детонацию при поджатия за счет истечения продуктов сгорания и прямое инициирование детонации.

### 4.1. Переход горения в детонацию

На рисунке 6 представлены зависимости преддетонационного расстояния в пропано-бутано-кислородной смеси и в ацетилено-кислородной смеси от ER. Данные приведены для бедных смесей, ER меньше 1. При одинаковом ER преддетонационное расстояние в ацетилено-кислородных смесях на 30-40% меньше, чем в пропан-бутановых смесях. Это объясняется меньшей шириной детонационной ячейки в ацетиленовых смесях. В стехиометрической ацетилено-кислородной смеси она равна 0.1 мм, в то время, как в стехиометрической пропано-бутано-кислородной она равна 1 мм.

### 4.2. Прямое инициирование детонации

Во втором случае из форкамеры в узкий канал входит уже сформированная детонационная волна. На рисунке 7 представлены экспериментальные данные о возможности прямого инициирования детонации в зависимости от энергии, выделяющейся при сгорании газа в форкамере, и от соотношения компонентов ER для пропан-бутановой и для ацетилено-кислородной смесей. Как и следовало ожидать, кривые, разграничивающая предельные значения, имеет вид параболы.

На рисунке представлены точки, выделенные треугольниками. Эти точки соответствуют экспериментам, при которых первая измерительная пара не регистрирует детонационную волны. Однако формирование детонации регистрируется на второй измерительной базе между 10 и 40 калибрами канала.

Полученные энергии инициирования для форкамерного инициирования существенно выше, чем энергии для плоского или даже сферического инициирования детонации:  $10^{-2}$ -0.5 Дж для ацетилена [1] и 0.6 Дж (ER=1) для пропано-бутановой смеси [2]. Это вызвано тем, что энергия выделяется не в узком пространственном промежутке, сравнимым с размером радиуса индукции, как в случае плоского или сферического инициирования, а в протяженном объеме конечной длины за длительное время.

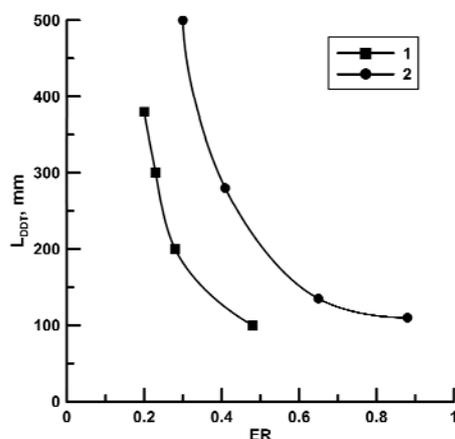


Рис.6. Преддетонационные расстояния в зависимости от ER при воздействии продуктов горения, истекающих из форкамеры. 1 – для ацетилено-кислородной смеси, 2 – для пропано-бутано-кислородной смеси.

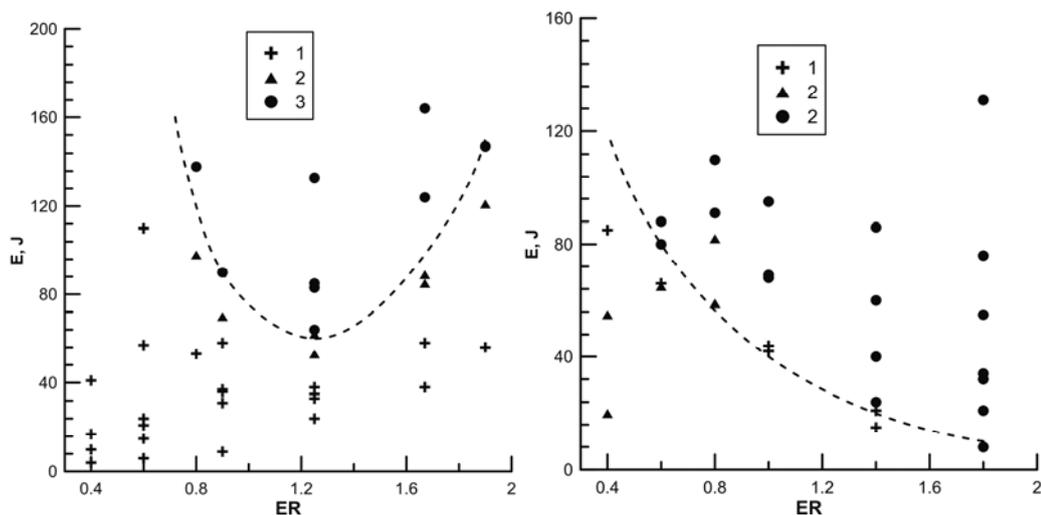


Рис.7. Зависимость энергии прямого инициирования с помощью форкамеры от ER. а, пропано-бутано-кислородная смесь; б, ацетилено-кислородная смесь. 1, прямое инициирование; 2, формирование детонации между 10 и 40 калибрами канала; 3, нет формирования детонации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано экспериментально, что динамика фронта пламени и волн сжатия в канале может развиваться по одному из трех сценариев: эффект поджатия за счет истекающих продуктов горения, комбинированное воздействие истекающих продуктов и волн сжатия, прямое инициирование детонации.

2. Для заданных размеров форкамеры можно определить такое соотношение между компонентами смеси, при котором динамика фронта пламени и ударных волн в канале может развиваться по одному из предложенных выше сценариев.

3. Аналогичная связь между сценарием формирования детонации, ER и размерами форкамеры обнаружена для ацетилено-кислородной смеси.

4. Представлена связь между энергией прямого инициирования с помощью форкамеры в зависимости от энергии сгорания смеси внутри форкамеры для пропано-бутано-кислородной смеси и для ацетилено-кислородной смеси.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Knystautas R., Lee J. H. Combustion and flame.* – 1976. – Т. 27. – С. 221-228.
2. *Zhang F. Shock wave science and technology reference library.* Springer, 2012.

## ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Golovastov S.V., Bivol G.Yu., Golub V.V. Prechamber initiation of gaseous detonation in a channel. Combustion Science and Technology. Повторно выслано после рецензии.

2. Golovastov S.V., Bivol G.Yu., Golub V.V. Prechamber initiation of detonation in gaseous mixtures. Open Access Journal of Physics: Conference Series (JPCS). Выслано в редакцию.

### Личное участие

3. Головастов С.В., Бивол Г.Ю., Голуб В.В. Форкамерное инициирование детонации в узких каналах // МЕХАНИКА И НАНОМЕХАНИКА СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД. УСПЕХИ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ СБОРНИК ТРУДОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ. Под редакцией проф. Ю.Г. Яновского. СБОРНИК ТРУДОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ. (23 декабря 2014 года – 31 января 2015 года, г. Москва). С. 135-144.

4 Г.Ю. Бивол, С.В. Головастов. Влияние форкамеры на формирование газовой детонации в узких каналах // 57-я научная конференция МФТИ с международным участием, посвященная 120-летию со дня рождения П. Л. Капицы «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики». 24–29 ноября 2014 года.

5. S. Golovastov, G. Bivol, V. Golub. On the Deflagration-to-Detonation Transition in Narrow Tube with Varying Prechamber-Initiator // 30th International Symposium on Shock Waves (ISSW30), which will be held on July 19-24, 2015 in Tel-Aviv.

6. Golovastov S.V., Bivol G.Yu., Golub V.V. Energies of prechamber initiation of detonation in propane-butane-oxygen and acetylene-oxygen mixtures // The International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems. Leeds, UK. August 2-7, 2015.