

УДК 534.222.2

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В СИСТЕМЕ ГАЗ – ПЛЁНКА ЖИДКОГО ГОРЮЧЕГО

© 2017 г. С.М. Фролов^{1, 2, 3*}, В.С. Аксёнов^{1, 2, 3}, И.О. Шамшин^{1, 2, 3}

Представлено академиком РАН А.А. Берлином 30.05.2016 г.

Поступило 24.10.2016 г.

Впервые экспериментально зарегистрирован переход горения в детонацию в канале с тонкой пристеночной плёнкой жидкого горючего и газообразным окислителем при слабом источнике зажигания, который не генерирует начальную ударную волну сколь-нибудь значительной интенсивности. В ряде опытов впервые зарегистрирован низкоскоростной квазистационарный детонационноподобный фронт горения, бегущий со средней скоростью 700–900 м/с, структура которого включает лидирующую ударную волну и следующую за ним зону реакции, разделённые временной задержкой от 80 до 150 мкс.

DOI:

Во всех известных экспериментальных исследованиях детонации в системе газ – плёнка детонационный взрыв инициировали мощными источниками. В 1952 г. М.Р. Люазон [1] наблюдал детонацию в такой системе в результате перепуска газовой детонации в трубу, заполненную воздухом, с нанесённой на стенки тонкой плёнкой жидкого горючего. В большой серии работ Я.К. Трошина с сотрудником (см., например, [2]) для инициирования “плёночной” детонации применяли подрывы навесок азидов свинца, капсюлей-детонаторов и т.д. в трубках диаметром от 6 до 30 мм длиной от 1,6 до 3,5 м с разными жидкими горючими (нефтяные масла, вязкие смазочные материалы, индивидуальные углеводороды) и с углеродом в виде сажи, которые наносились в виде плёнок и слоев на внутреннюю поверхность трубок, и с разным газом-окислителем (кислород или воздух, обогащенный кислородом) при начальном давлении от 1 до 40 атм. Показано, что при таком сильном инициировании всегда требовался переходный участок, равный 20–30 диаметрам трубы, по которому распространялось ускоряющееся пламя, впоследствии переходящее в детонацию. Аналогичные результаты были позже получены в [3, 4].

Гетерогенная система газ–плёнка имеет ряд важных преимуществ для использования в непрерывно-детонационных (НДКС) [5] и в импульсно-детонационных (ИДКС) [6] камерах сгорания на жидком топливе. Во-первых, в такой системе детонация наблюдается в системах с плёнками практически любой толщины [2], что снижает требования к точности дозирования топлива и повышает надёжность рабочего процесса. Во-вторых, систему газ–плёнка можно дополнительно использовать для активной тепловой защиты стенок НДКС и ИДКС при подаче плёнки на теплонапряженные участки камеры. К недостаткам системы газ–плёнка можно было бы отнести отмеченную в литературе необходимость использования мощных источников инициирования детонации, однако при внимательном анализе литературы оказалось, что в ней нет каких-либо упоминаний о попытках организации перехода горения в детонацию (ПГД) в такой системе при использовании слабых источников зажигания, которые не генерируют начальную ударную волну (УВ) сколь-нибудь значительной интенсивности.

Цель данной работы – экспериментально исследовать возможность ПГД в системе плёнка жидкого горючего–кислород при зажигании слабым источником.

В работе впервые экспериментально зарегистрирован ПГД в системе газ (кислород) – плёнка жидкого горючего (н-гептан) в прямом гладком канале с тонкой пристеночной плёнкой жидкого горючего и газообразным окислителем при слабом источнике зажигания. Показано, что

¹ Центр импульсно-детонационного горения, Москва.

² Институт химической физики им. Н.Н. Семенова

Российская Академия наук, Москва

³ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, г. Москва

*E-mail: smfrol@chph.ras.ru

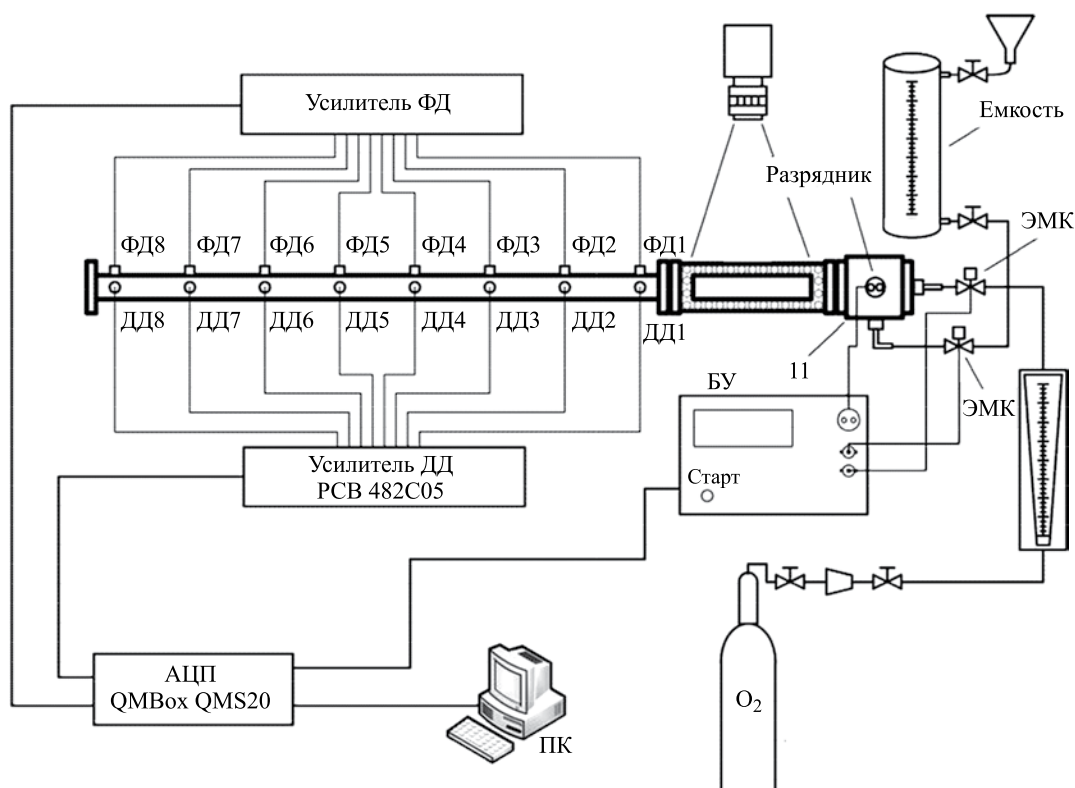


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

в результате ПГД в системе газ–плёнка в канале может распространяться как высокоскоростная (скорость 1800–2000 м/с), так и низкоскоростная (700–900 м/с) волны детонации. Полученные результаты носят пионерский характер и существенно важны для развития новых систем реактивного движения, основанных на управляемом детонационном горении штатных моторных топлив, а также для совершенствования систем пожаро- и взрывобезопасности.

Исследования проведены на экспериментальной установке, схема которой показана на рис. 1. Измерительная секция – прямой канал прямоугольного сечения 54×24 мм длиной 3 м с полированными внутренними стенками. Для регистрации волн давления и свечения, вызванного горением, в одних и тех же сечениях канала на двух боковых смежных стенках по центру с шагом 400 мм проделаны отверстия для датчиков давления (ДД1–ДД8) марки РСВ 113В24 и фотоэлектрических датчиков (ФД1–ФД8) марки ФД265А. Плёнка жидкого горючего всегда располагалась на нижней стенке канала. Датчики ФД1–ФД8, как правило, устанавливались на верхней стенке канала, а датчики ДД1–ДД8 – на боковой стенке на высоте 27 мм над плёнкой жидкого горючего. Положение датчиков: $X^* = 170(1), 570(2), 970(3), 1370(4), 1770(5), 2170(6), 2570(7), 2970$ мм (8).

К оптической секции крепилась секция ввода топлива и окислителя длиной 60 мм с внутренним каналом 22×50 мм. С противоположной стороны торца секции был закрыт глухим фланцем. В середине секции устанавливался электрический разрядник. Между двумя параллельными электродами разрядника, расположенными на расстоянии 10 мм один от другого, закреплялась медная проволочка диаметром 150 мкм. Проволочка располагалась параллельно оси канала на расстоянии 13 мм над плёнкой жидкого горючего.

Жидкое горючее подавалось в канал из топливной ёмкости по магистрали с электромагнитным клапаном (ЭМК) через пять отверстий, расположенных на дне канала на расстоянии 25 мм от закрытого торца. Кислород поступал в канал из баллона через редуктор и ротаметр по магистрали с ЭМК через отверстие диаметром 3 мм, расположенное в центре закрытого торца канала. Управление ЭМК, а также подрывом медной проволочки осуществлялось блоком управления (БУ, рис. 1).

Перед опытом канал устанавливали с уклоном к линии горизонта $3,5^\circ$, чтобы поступающее в него жидкое горючее растекалось по дну, создавая тонкую плёнку. Расход горючего рассчитывали по изменению уровня жидкости в ёмкости за известный интервал времени. Расход кислорода настраивали по показаниям ротаметра. Блок

Таблица 1. Результаты опытов

№	E_i , Дж	u_{O_2} , см/с	δ_f , мм	M_0	L_* , см	T_* , мс	D , м/с	Детонационный режим
1	14±1	0	0,5	1,1	100	4,5	1800/980	+/-
2	27±1	0	0,5	1,2	96	3,8	1810	+
3		2	0,4	1,1	122	7,5	2060	+
4		13	0,4	1,0	176	22,5	1875	+
5		13	0,7	1,2	—	—	760	—
6	52±3	2	0,4	1,0	196	10,1	1920	+
7		13	0,4	1,0	—	—	740	—
8		13	0,4	1,0	190	30,7	1700	+
9		13	0,7	1,2	103	3,8	1925	+
10		13	0,7	1,4	100	2,6	1890	+
11	210±10	2	0,4	1,4	104	3,5	1970	+
12		13	0,3	1,2	108	4,3	1815	+
13		13	0,4	1,2	210	7,2	2030	+
14		13	0,4	1,2	110	4,6	1850	+
15		13	0,7	1,4	152	3,5	1930	+
16	480±10	13	0,4	1,4	112	3,6	1870	+

управления программировался по временным интервалам. В течение первого интервала продолжительностью от 60 до 120 с проводили трёхкратную продувку объёма канала кислородом. В течение второго интервала продолжительностью 80 с канал продувался кислородом вместе с подачей горючего: в канале создавалась плёнка жидкого горючего. Затем подача кислорода и горючего быстро прекращалась и выдавалась команда на подрыв проволочки конденсатором ёмкостью $C = 6800$ мкФ, предварительно заряженным до напряжения U . Энергию разряда определяли как $E_i = CU^2/2$.

Среднюю скорость течения жидкого горючего внутри канала оценивали по времени, когда горючее начинало вытекать через открытый конец канала. При указанном уклоне канала средняя скорость движения плёнки жидкого горючего составляла 6 ± 1 см/с. Средний расход горючего в каждом опыте определяли по высоте столба жидкости до и после опыта, а по расходу горючего рассчитывали среднюю толщину плёнки δ_f . Опыты проведены для пяти различных значений энергии зажигания E_i (от 14 до 480 Дж) и для трёх значений скорости продувки канала кислородом u_{O_2} : 0, 2 и 13 см/с. В опытах впервые зарегистрирован ПГД в системе газ–плёнка при слабом источнике зажигания, который не генерирует начальную УВ сколь-нибудь значительной интенсивности. Здесь проведен анализ полученных результатов.

В табл. 1 приведены экспериментальные результаты в 16 опытах: значения преддетонационного расстояния L_* и времени T_* , средней скорости детонационной волны (ДВ) D и среднего числа Маха УВ M_0 , генерируемой источником зажигания на первой измерительной базе, при заданных значениях энергии зажигания E_i , скорости продувки канала кислородом u_{O_2} и толщине пленки н-гептана δ_f . Знаком “плюс” отмечены режимы распространения фронтов реакции со скоростями, близкими к скорости детонации ($D > 1500$ м/с), для которых совпадают моменты резкого отклонения сигналов датчиков давления (ДД) и фотоэлектрических датчиков (ФД), установленных в одном сечении канала. Знаком “минус” отмечены обнаруженные впервые низкоскоростные режимы распространения фронта реакции, для которых наблюдается значительное (но установившееся) отставание фронта свечения от ударного фронта. Преддетонационное расстояние L_* и время T_* определяли как координаты точки пересечения экстраполированных прямых на экспериментальной диаграмме расстояние – время ($x-t$ диаграмма), описывающей распространение ДВ и волны ретонации, образованной в результате вторичного взрыва (“взрыва во взрыве” по терминологии А.К. Оппенгейма). Скорость ДВ D определяли как среднее значение на двух–трёх измерительных базах в зависимости от величины преддетонационного расстояния L_* .

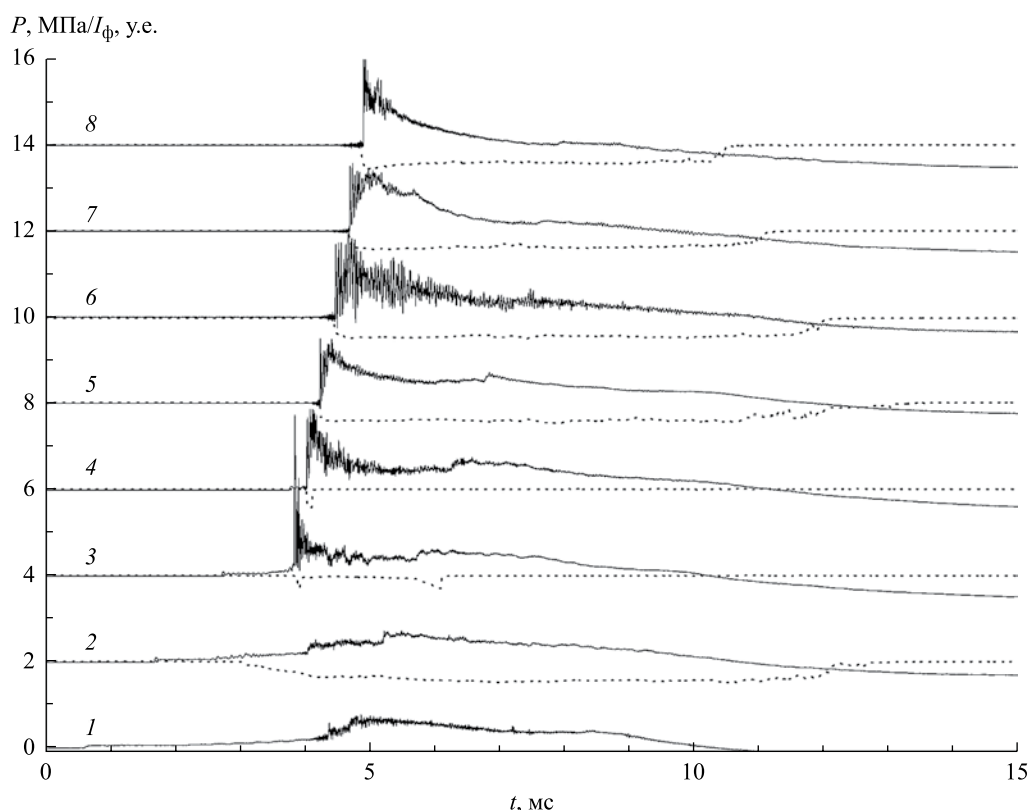


Рис. 2. Записи ДД (сплошные кривые) и ФД (пунктирные кривые) для опыта 2.

На рис. 2 приведён пример записей датчиков ДД1–ДД8 (сплошные кривые) и ФД2–ФД8 (пунктирные кривые) в опыте 2 с энергией зажигания 27 Дж в отсутствие обдува пленки кислородом. Из записей датчиков ДД1–ДД4 видно, что при взрыве проволоочки образуется слабая (квазиакустическая) УВ, которая распространяется со скоростью около 380 м/с ($M_0 = 1,17$). Незначительное повышение давления в этой волне еле заметно на соответствующих записях ДД1–ДД4 в моменты времени 0,6, 1,7, 2,7 и 3,8 мс. Первые признаки свечения возникают в момент времени 3 мс в сечении 2 на датчике ФД2 без существенного повышения давления, причём свечение продолжается в течение 10 мс и свидетельствует о наличии горения в этом сечении. Резкое повышение давления (на $\sim 3,5$ МПа) в фазе со свечением происходит в сечении 3, расположенном на расстоянии 0,97 м от закрытого конца канала. На датчиках ДД4–ДД8 амплитуда волны давления, бегущей к открытому концу канала приблизительно постоянна и достигает 1,5–1,7 МПа, причём начало отклонения сигналов фотодатчиков ФД4–ФД8 от нулевой линии совпадает с приходом волны давления в эти сечения, т.е. реакция инициируется мощной УВ.

Скорости волны давления (фронта реакции) D_{4-5} , D_{5-6} , D_{6-7} и D_{7-8} на соответствующих измерительных базах ДД4–ДД5 (ФД4–ФД5), ДД5–ДД6

(ФД5–ФД6), ДД6–ДД7 (ФД6–ФД7) и ДД7–ДД8 (ФД7–ФД8) приблизительно одинаковы и близки к значению ~ 1810 м/с. Совпадение моментов начала сигналов давления и свечения в сечениях 3–8, а также уровень скорости волны давления и фронта реакции свидетельствуют о распространении здесь ДВ с быстрым смесеобразованием за фронтом лидирующей УВ и самовоспламенением образованной горючей смеси. Переход горения в детонацию происходит на расстоянии $L^* \sim 1$ м от точки зажигания через время $T^* = 3,8$ мс после зажигания. Обратим внимание на тот факт, что в месте ПГД сигнал свечения имеет значительно меньшую продолжительность, чем в сформировавшейся ДВ (сравните сигналы датчиков ФД4 и ФД5). По-видимому, в месте ПГД происходит быстрое и полное локальное выгорание одного из компонентов горючей смеси – кислорода или паров горючего.

Учитывая расположение ДД и ФД, можно утверждать, что фронт ДВ практически плоский, по крайней мере, до высоты ~ 27 мм над плёнкой. Термодинамический расчёт параметров детонации стехиометрической смеси н-гептана с кислородом без учета диссоциации даёт следующие значения параметров детонации Чепмена – Жуге (индекс CJ): скорость $D_{CJ} = 2340$ м/с, давление $P_{CJ} = 3,9$ МПа, температуру $T_{CJ} = 3860$ К и скорость звука

$a_{CJ}=1260$ м/с. Основываясь на расчётном значении скорости звука в продуктах детонации, можно оценить частоту поперечных волн по ширине (~26 кГц) и по высоте (~12 кГц) канала. На рис. 2 частота пульсаций давления за детонационным фронтом составляет 24–38 кГц, т.е. согласуется с верхней оценкой. Однако уровни максимального и среднего давления в ДВ на рис. 2 (~1,5 и ~1 МПа соответственно) оказались заметно ниже расчётного давления. В рассматриваемом примере весь волновой процесс сгорания горючей смеси происходит очень быстро – за ~5 мс.

На рис. 3 показана $x-t$ диаграмма развития процесса в опыте 2. Для построения таких диаграмм анализировали записи давления и свечения с выделением характерных точек, соответствующих фронтам УВ и ДВ, а также волнам реакции, ретонации и разрежения. Видно, что после начальной стадии ускорения пламени в канале происходит вторичный взрыв (излом на кривой 2 на расстоянии ~1 м), после чего образуется ДВ (кривые 2 и 3 сливаются), которая догоняет квазиакустическую УВ от источника зажигания (кривая 1).

В опыте 1, проведенном при меньшей энергии зажигания (14 Дж) по сравнению с опытом 2, наблюдалась интересная особенность – высокоскоростной режим горения с ДВ через некоторое

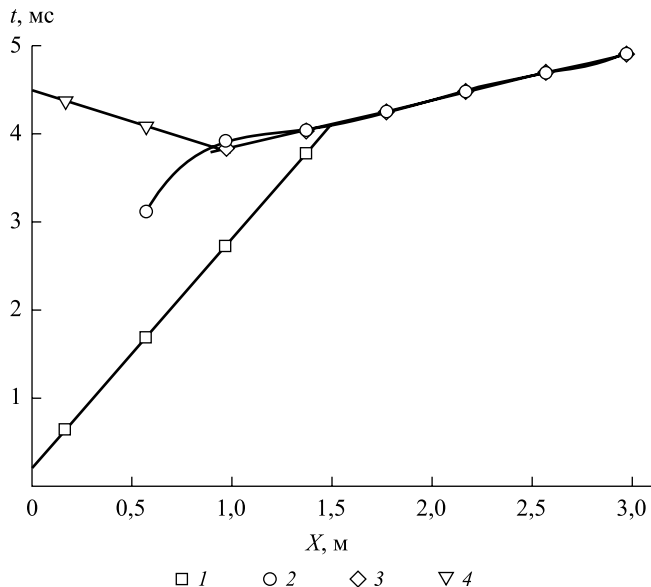


Рис. 3. Экспериментальная $x-t$ -диаграмма опыта 2. Кривые 1 – слабая ударная волна от источника зажигания, 2 – фронт пламени, 3 – детонационная волна, 4 – волна ретонации.

время сменился низкоскоростным режимом горения с разделёнными ударным фронтом и фронтом реакции (рис. 4). Действительно, на рис. 4, начиная с сечения 6 видно некоторое отставание

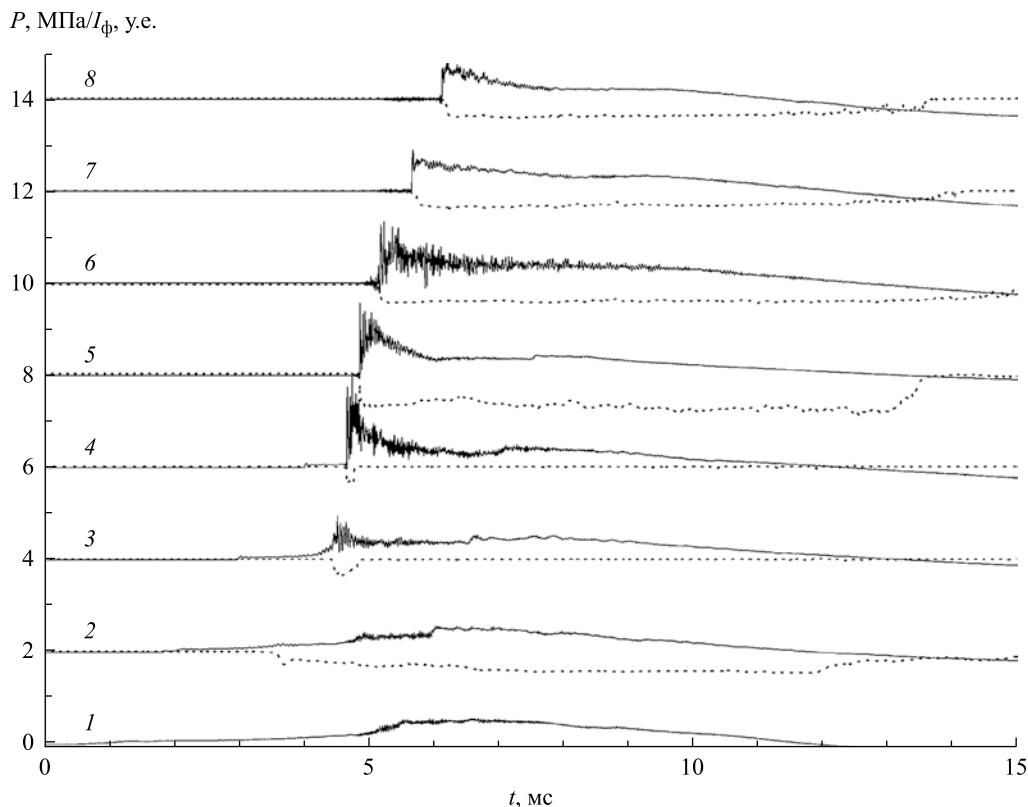


Рис. 4. Записи ДД (сплошные кривые) и ФД (пунктирные кривые) для опыта 1.

сигнала свечения от ударного фронта. Кроме того, средняя скорость УВ на измерительной базе ДД6–ДД7 снижается приблизительно на 1200 м/с – от значения $D_{4-5} = 2020$ м/с до значения $D_{6-7} = 820$ м/с, а на базе ДД7–ДД8 – до значения $D_{7-8} = 860$ м/с. Вследствие ограниченной длины измерительной секции нельзя с уверенностью утверждать, является ли наблюдаемый низкоскоростной (800–900 м/с) режим распространения фронта реакции устойчивым. Для определения причины кратковременного периода существования ДВ в опыте 1 с последующей сменой режима распространения фронта реакции требуются дополнительные исследования.

В других опытах с энергией зажигания 27 Дж, а также в опытах с $E_i = 52$ Дж наблюдался ПГД как с очень короткой продолжительностью преддетонационного периода, так и с существенно более продолжительным преддетонационным периодом, но без смены высокоскоростного режима горения на низкоскоростной (например, в опытах 4 и 8). В отдельных опытах с такой энергией зажигания (опыты 5 и 7) наблюдался только низкоскоростной режим горения. Другими словами, от опыта к опыту продолжительность преддетонационного периода и преддетонационное расстояние несколько изменялись.

В экспериментах с относительно большими энергиями зажигания (210 Дж) также зарегистрированы изменения преддетонационного расстояния от опыта к опыту. Так, в опыте 12 ПГД происходил на расстоянии $L_* \sim 1,1$ м, а в опыте 13 – на расстоянии $L_* \sim 2,1$ м, хотя условия опытов были в целом одинаковыми, а различия в толщине плёнки укладывались в погрешность измерений. На самом деле определить реальную толщину плёнки очень сложно даже при тщательных замерах расходов, поскольку неизвестно точное значение площади смачиваемой поверхности вследствие капиллярных эффектов

и частичного уноса горючего при продувке канала кислородом.

Таким образом, в работе экспериментально зарегистрирован ПГД в системе газ–плёнка при слабом источнике зажигания. Несмотря на некоторые различия в динамике развития детонационного взрыва от опыта к опыту, как с разными, так и с одинаковыми энергиями зажигания, измеренная скорость ДВ не зависела от энергии зажигания и составляла 1800–2000 м/с (77–85% от скорости детонации Чепмена–Жуге), а профили давления и свечения в ДВ сохраняли свою форму. В ряде опытов впервые зарегистрирован низкоскоростной квазистационарный детонационноподобный фронт горения, бегущий со средней скоростью 700–900 м/с, структура которого включает лидирующую УВ и следующую за ним зону реакции, разделённые временной задержкой от 80 до 150 мкс.

Полученные результаты могут быть использованы для организации рабочего процесса в НДКС и ИДКС с подачей жидкого топлива в виде пристеночной плёнки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15–08–00782).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Loison R.* // С. R. 1952. V. 234. № 5. P. 512–513.
2. *Комов В.Ф. Трошин Я.К.* // ДАН. 1967. Т. 175. № 1. С. 109–112.
3. *Ragland K.W., Nicholls J.A.* // AIAA J. 1969. V. 7. № 5. P. 859–863.
4. *Sichel M., Rao C.S., Nicholls J.A.* // Proc. Combust. Inst. 1971. V. 13. P. 1141–1149.
5. *Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W.* // Progress Energy and Combust. Sci. 2004. Vol. 30. No. 6. P. 545–672.
6. *Войцеховский Б.В.* // ДАН. 1959. Т. 129. № 6. С. 1254–1256.