

## ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В СИСТЕМЕ «КИСЛОРОД – ПЛЕНКА ЖИДКОГО n-ГЕПТАНА»\*

С. М. Фролов<sup>1</sup>, В. С. Аксёнов<sup>2</sup>, И. О. Шамшин<sup>3</sup>

**Аннотация:** Впервые экспериментально зарегистрирован переход горения в детонацию (ПГД) в системе «газ–пленка» при слабом источнике зажигания, который не генерирует начальную ударную волну (УВ) сколь-нибудь значительной интенсивности. В серии опытов с разной энергией зажигания (от 14 до 480 Дж) в прямом гладком канале прямоугольного сечения 54 × 24 мм длиной 3 м с одним открытым концом получен ПГД в системе «газ (кислород) – пленка жидкого топлива (n-гептан)» на расстояниях от 1 до 2 м от источника зажигания за время от 2,6 до 31 мс после момента зажигания. Несмотря на различия в динамике развития детонационного взрыва от опыта к опыту как с разными, так и с одинаковыми энергиями зажигания, измеренная скорость детонационной волны (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. Анализ структуры ДВ дает основание полагать, что к фронту ДВ, бегущему над поверхностью пленки, под углом около 45° примыкает движущаяся в следе косая УВ. Скоростная видеосъемка развития процесса на начальном участке канала показала, что горение в канале развивается в относительно узком слое над жидкой пленкой и даже на сравнительно больших временах, сопоставимых с преддетонационным периодом, занимает только часть сечения канала. 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, разделенные временной задержкой от 80 до 150 мкс.

**Ключевые слова:** пленка жидкого топлива; кислород; переход горения в детонацию; режимы горения; эксперимент; скоростная видеосъемка

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-08-00782).

<sup>1</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центр импульсно-детонационного горения; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

<sup>2</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центр импульсно-детонационного горения; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», v.aksenov@mail.ru

<sup>3</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центр импульсно-детонационного горения; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», shamshin@idgcenter.ru

## Введение

В связи с потенциальной возможностью увеличения энергоэффективности двигательных установок для летательных аппаратов в настоящее время активно изучаются две основные схемы организации детонационного горения: в ДВ, непрерывно циркулирующих в тангенциальном направлении поперек камеры сгорания (непрерывно-детонационные камеры сгорания (НДКС) [1]) и в периодических детонационных волнах, бегущих вдоль камеры сгорания (импульсно-детонационные камеры сгорания (ИДКС) [2]). Первую схему считают перспективной для дальнейшего совершенствования жидкостных ракетных двигателей и турбореактивных двигателей, а вторую — прямоточных воздушно-реактивных двигателей.

В патенте [3] предложен способ организации рабочего процесса в НДКС реактивного двигателя на жидком топливе и соответствующее устройство, включающее подачу окислителя, подачу жидкого топлива в виде струй и пристеночных пленок, инициирование непрерывно-детонационного горения топливной смеси в проточной кольцевой камере сгорания с помощью инициатора детонации и создание высокоскоростной реактивной струи продуктов детонации при помощи выходного сопла с центральным телом. В патенте [4] предложены варианты устройства ИДКС, в которых обеспечивается инициирование детонации жидкого топлива с воздухом через стадию быстрого ПГД при минимальном преддетонационном расстоянии и минимальных затратах энергии на зажигание топливной смеси, причем жидкое топливо может подаваться в камеру сгорания как в виде струй, так и в виде пристеночных пленок.

Для организации рабочего процесса в НДКС и ИДКС с подачей жидкого топлива в виде пристеночной пленки необходимо знать механизм распространения и свойства гетерогенной детонации в системе «газ–пленка», а также требования к инициированию детонации.

В отличие от газовой детонации, которая распространяется в предварительно перемешанной топливной смеси, гетерогенная детонация в системе «газ–пленка» распространяется в двухфазной среде, состоящей из газообразного окислителя и топливной пленки на ограничивающих поверхностях [4–20]. Процессу тепловыделения в волне гетерогенной детонации предшествует смесеобразование. Горючая топливная смесь образуется в результате частичного предварительного испарения пленки, аэродинамического дробления пленки в газовом потоке за лидирующей УВ детонационного фронта, испарения фрагментов дробления (микрокапель) и турбулентно-молекулярного смешения паров топлива с окислителем. Тепловыделение начинается с очагового самовоспламенения частично перемешанной смеси за лидирующей УВ. Дальнейшее распространение реакции в пространстве во многом определяется локальным составом смеси. Здесь возможны все известные режимы распространения реакции: ламинарные и турбулентные, диффузионные и гомогенные пламена, «спонтанные» пламена и переходные режимы горения с ударными волнами. При частичном предварительном испарении пленки са-

мовоспламенение вещества за лидирующей УВ может наступить раньше, чем без такого предварительного испарения, и, кроме того, может возрасти вклад стадии самовоспламенения в общее тепловыделение. В пределе, когда почти все топливо находится в паровой фазе, волна гетерогенной детонации в системе «газ–пленка», вообще говоря, вырождается в газовую детонацию.

Во всех известных экспериментальных исследованиях детонацию в системе «газ–пленка» инициировали мощными источниками. По-видимому, впервые детонацию в такой системе наблюдал М. Р. Люазон [4] в трубе диаметром 250 мм и длиной от 80 до 100 м, которую заполняли воздухом и на стенки которой наносили пленку масла толщиной от 0,1 до 0,3 мм. Иницирующий импульс генерировали с помощью сжигания метановоздушной смеси (начальное давление 7 атм) в присоединенной секции длиной 4 м, которая отделялась от основной трубы разрывной мембраной. В отличие от газовой детонации, которая возникает вблизи мощного источника инициирования, детонационноподобная взрывная волна в экспериментах [4] возникала после длительного переходного периода и распространялась с видимой скоростью около 1200 м/с. В работах Я. К. Трошина с сотр. (см., например, [7]) для инициирования 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 пленок 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.

Гетерогенная система «газ–пленка» имеет ряд важных преимуществ для использования в НДКС и ИДКС на жидком топливе. Во-первых, в системе «газ–пленка» отсутствует богатый предел распространения детонации, т. е. детонация наблюдается в системах с пленками практически любой толщины [7], что снижает требования к точности дозирования топлива и повышает надежность рабочего процесса. Во-вторых, систему «газ–пленка» можно дополнительно использовать для активной тепловой защиты стенок НДКС и ИДКС при подаче пленки на теплонапряженные участки камеры. В-третьих, в стратифицированной системе «газ–пленка», которая характеризуется относительно малой площадью межфазной поверхности раздела (по сравнению с системой «газ–капли»), предварительное испарение жидкости перед лидирующей УВ детонационного фронта незначительно, что препятствует различным нарушениям рабочего процесса (проскокам пламени и т. д.). К недостаткам системы «газ–пленка» 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 ПГД в такой системе при использовании сла-

рых источников зажигания, которые не генерируют начальную УВ сколь-нибудь значительной интенсивности.

Цель данной работы — экспериментально исследовать возможность ПГД в системе «пленка жидкого топлива – кислород» при зажигании слабым источником.

### Экспериментальная установка

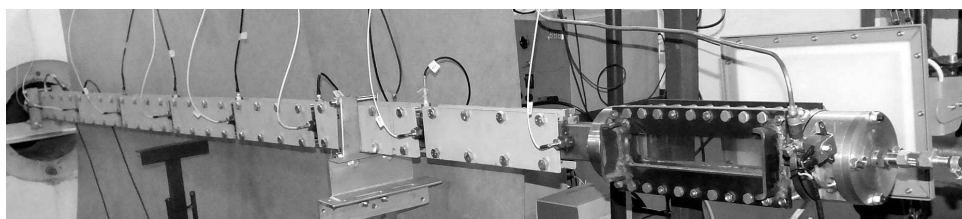
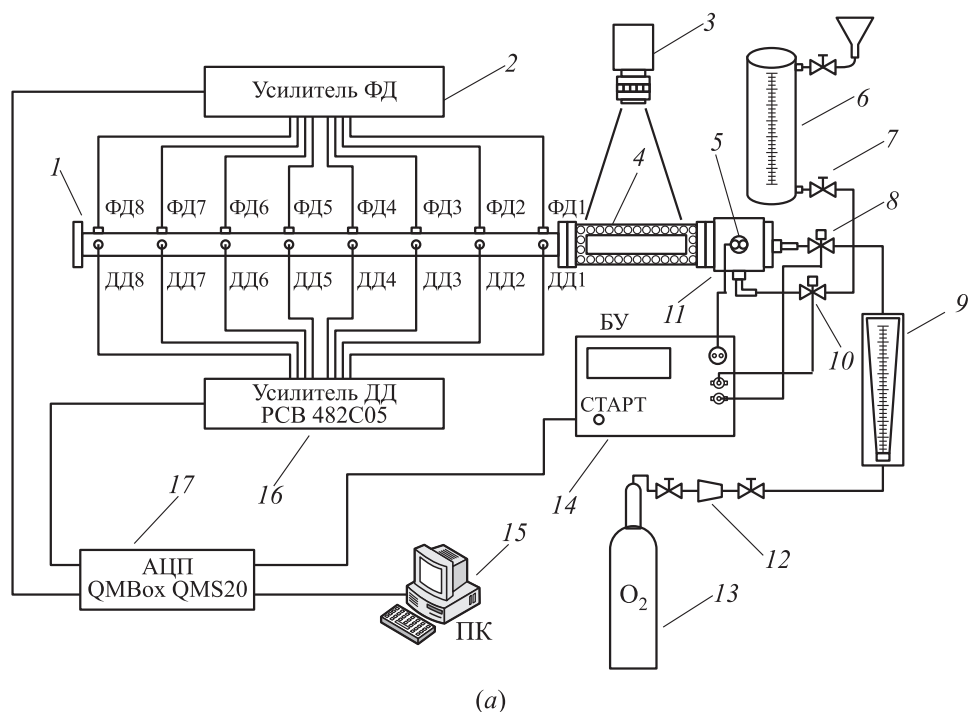
Исследования ПГД в системе «газ–пленка» выполнены на экспериментальной установке, схема и фотография которой показаны на рис. 1, *a* и 1, *б* соответственно. Измерительная секция 1 изготовлена из прямого канала прямоугольного внутреннего сечения  $54 \times 24$  мм с толщиной стенки 3 мм и длиной 3 м, выполненного из нержавеющей стали. К концам канала приварены фланцы для присоединения дополнительных секций. Для регистрации волн давления и свечения, вызванного горением, в одних и тех же сечениях канала на двух боковых смежных плоскостях канала по центру с шагом 400 мм (см. рис. 1) установлены резьбовые втулки с отверстиями диаметром 4 мм для датчиков давления (ДД1–ДД8) марки РСВ 113В24 и фотоэлектрических датчиков (ФД1–ФД8) марки ФД265А, причем нумерация датчиков производится по номерам сечений (1–8), в которых они установлены. Расположение датчиков на двух боковых смежных плоскостях позволяет проводить эксперименты в двух положениях канала: пленку жидкого топлива можно наносить как на узкую стенку шириной 24 мм, так и на широкую стенку шириной 54 мм при повороте измерительной секции 1 на  $90^\circ$ .

В большинстве опытов датчики ФД1–ФД8 располагались над пленкой на верхней стенке канала. Такое расположение позволяло регистрировать свечение лидирующего фронта реакции, даже если он неплоский. Датчики ДД1–ДД8 располагались на боковой поверхности канала на высоте 27 мм над пленкой жидкого топлива.

Для уменьшения шероховатости внутреннюю поверхность канала предварительно отшлифовали.

К измерительной секции присоединена оптическая секция 4 длиной 355 мм, по центру которой установлено оптическое окно из кварцевого стекла с размером видимой области  $50 \times 270$  мм. К оптической секции крепится секция ввода топлива и окислителя 11 длиной 60 мм с внутренним каналом  $22 \times 50$  мм. С противоположной стороны торец секции закрыт глухим фланцем. В середине секции 11 установлен электрический разрядник 5, причем его ось смещена по высоте на 12 мм от оси канала. Между двумя параллельными электродами разрядника 5, расположенными на расстоянии 10 мм друг от друга, закреплялась медная проволочка диаметром 150 мкм. Проволочка располагалась параллельно оси канала на расстоянии 11 мм от обеих боковых стенок на расстоянии 13 мм над пленкой жидкого топлива.

Жидкое топливо подается в канал из топливной емкости 6 по магистрали с электромагнитным клапаном (ЭМК) 10 через пять отверстий, расположенных на дне



**Рис. 1** Схема экспериментальной установки (а) и фотография измерительной секции (б): 1 — измерительная секция; 2 — усилитель сигнала фотоэлектрических датчиков; 3 — высокоскоростная видеокамера; 4 — оптическая секция; 5 — разрядник; 6 — емкость с топливом; 7 — вентиль тонкой регулировки подачи топлива; 8 — ЭМК на магистрали подачи кислорода; 9 — ротаметр; 10 — ЭМК на магистрали подачи топлива; 11 — секция ввода топлива и окислителя; 12 — кислородный редуктор; 13 — баллон с кислородом; 14 — блок управления; 15 — персональный компьютер; 16 — усилитель сигнала датчиков давления; 17 — АЦП

**Таблица 1** Расстояние от закрытого торца канала до места установки датчиков

Позиция	X, мм	
	без установленной оптической секции	с установленной оптической секцией
1	170	525
2	570	925
3	970	1325
4	1370	1725
5	1770	2125
6	2170	2525
7	2570	2925
8	2970	3325

канала на расстоянии 25 мм от закрытого торца. Емкость 6 объемом 100 мл изготовлена из стеклянной трубы (органическое стекло марки PLEXIGLAS) диаметром 30 мм, толщиной 5 мм и длиной 300 мм и снабжена вентилями для заливки и слива топлива, а также вентилем 7 тонкой регулировки расхода топлива. Кислород подается в канал из баллона 13 через редуктор 12 и ротаметр ЭМИС-МЕТА-210Р 9 по магистрали с ЭМК 8 через отверстие диаметром 3 мм, расположенное в центре закрытого торца канала.

Расход кислорода настраивается давлением на выходе редуктора 12 и регулировочным вентилем на ротаметре 9.

Управление ЭМК 10 и 8, а также подрывом медной проволочки осуществляется блоком управления 14, который состоит из программируемого таймера, силового блока цепей питания линий управления и конденсаторной емкости номиналом 6800 мкФ, разряжаемой через разрядник 5. Блок управления 14 используется для запуска аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 17, к которому через усилители 2 и 16 подключены датчики ФД1–ФД8 и ДД1–ДД8. Расстояния, на котором расположены датчики, приведены в табл. 1. Частота дискретизации данных АЦП установлена равной 600 кГц. Данные, поступающие с АЦП (R-Technology QMBox QMS20) 17, записываются на регистраторе — персональном компьютере 15. В ряде опытов при помощи высокоскоростной видеокамеры Miro LC310 фирмы Phantom 3 проводилась видеорегистрация развития процесса на начальном участке — в оптической секции 4.

## Методика проведения экспериментов

Перед опытом канал устанавливали с определенным уклоном к линии горизонта (3,5°), чтобы поступающее в него жидкое топливо растекалось по дну, создавая тонкую пленку. На фотографии (см. рис. 1, б) видно, что измерительная секция

закреплена на двух опорах, одна из которых имеет регулировку по высоте. Далее в секцию ввода топлива и окислителя 11 устанавливали разрядник 5 с медной проволокой. Затем в топливную емкость 6 наливали жидкое топливо — н-гептан — и при открытом вентиле 10 с помощью вентиля 7 настраивали расход топлива. Расход топлива рассчитывали по изменению уровня топлива в емкости 6 за известный интервал времени. Расход кислорода настраивали по показаниям ротаметра 9 при открытом вентиле 8. Блок управления 14 программировался по временным интервалам. В течение первого интервала продолжительностью от 60 до 120 с проводилась трехкратная продувка объема канала кислородом. В течение второго интервала продолжительностью 80 с канал продувался кислородом вместе с подачей топлива: в канале создавалась пленка жидкого топлива. Затем подача кислорода и топлива прекращалась путем отключения ЭМК 8 и 10 и одновременно выдавалась команда на запуск АЦП 17, а через 100 мс следовала команда на подрыв проволоки конденсатором емкостью  $C = 6800$  мкФ, предварительно заряженным до напряжения  $U$  В. Энергию разряда рассчитывали по формуле  $E_i = CU^2/2$ .

Среднюю скорость течения жидкого топлива внутри канала оценивали по времени, когда топливо начинало вытекать через открытый конец канала. При наклоне канала в  $3,5^\circ$  средняя скорость движения пленки жидкого топлива составляла  $(6 \pm 1)$  см/с.

Средний расход топлива в каждом опыте определяли по высоте столба топлива до проведения опыта  $h_{т0}$  и после опыта  $h_{т1}$  по формуле  $Q_T = (h_{т0} - h_{т1})\pi/800$ , где расход измеряется в см<sup>3</sup>/с при высоте столба, выраженной в миллиметрах. По расходу топлива  $Q_T$  рассчитывали среднюю толщину пленки  $\delta_f = 100Q_T/(uw)$ , где  $w = 24$  мм — ширина канала,  $u = 6$  см/с — скорость растекания топлива.

## Экспериментальные результаты

Опыты проведены для пяти различных значений энергии зажигания  $E_i$  (от 14 до 480 Дж) и для трех значений скорости продувки канала кислородом  $u_{O_2}$ : 0, 2 и 13 см/с. Основная часть опытов проведена без оптической секции.

В опытах впервые зарегистрирован ПГД в системе «газ–пленка» при слабом источнике зажигания, который не генерирует начальную УВ сколь-нибудь значительной интенсивности. Ниже проведен анализ результатов, получаемых в опытах по мере увеличения энергии зажигания.

В табл. 2 приведены экспериментальные результаты в 16 опытах: значения преддетонационного расстояния  $L_*$  и периода времени  $T_*$ , средней скорости 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  $\delta_f$ . Знаком «+» отмечены режимы распространения фронтов реакции со скоростями, близкими к скорости детонации ( $D > 1500$  м/с), для которых совпадают моменты резкого отклонения сигналов датчиков давления и фотоэлектрических датчиков, установ-

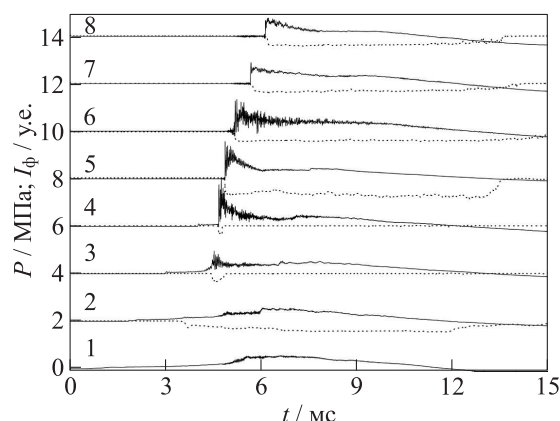
**Таблица 2** Результаты опытов

№	$E_i$ , Дж	$u_{O_2}$ , см/с	$\delta_f$ , мм	$M_0$	$L_*$ , см	$T_*$ , мс	$D$ , м/с	Дет. режим
1	$14 \pm 1$	0	0,5	1,1	100	4,5	1800/980	+/-
2	$27 \pm 1$	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	$52 \pm 3$	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	$210 \pm 10$	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	$480 \pm 10$	13	0,4	1,4	112	3,6	1870	+

ленных в одном сечении канала. Знаком «—» 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» ( $x-t$  диаграмме), описывающих 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–трех измерительных базах в зависимости от величины преддетонационного расстояния  $L_*$ .

На рис. 2 приведен пример записей датчиков ДД1–ДД8 (сплошные кривые) и ФД2–ФД8 (пунктирные кривые) в опыте № 1 с энергией зажигания 14 Дж. Из записей датчиков ДД1–ДД4 видно, что при взрыве проволоочки образуется слабая (квазиакустическая) УВ, которая распространяется со скоростью около 380 м/с ( $M_0 = 1,1$ ). Незначительное повышение давления в этой волне еле заметно на соответствующих записях ДД1–ДД4 в моменты времени 0,7, 1,8, 3 и 4 мс. Первые признаки свечения возникают в момент времени 3,5 мс в сечении 2 на датчике ФД2 без существенного повышения давления, причем свечение продолжается в течение 10 мс и свидетельствует о наличии горения в этом сечении. Заметное повышение давления (на  $\sim 0,5$  МПа) в фазе со свечением происходит в сечении 3, расположенном на расстоянии 0,97 м от закрытого конца канала. На датчиках ДД4

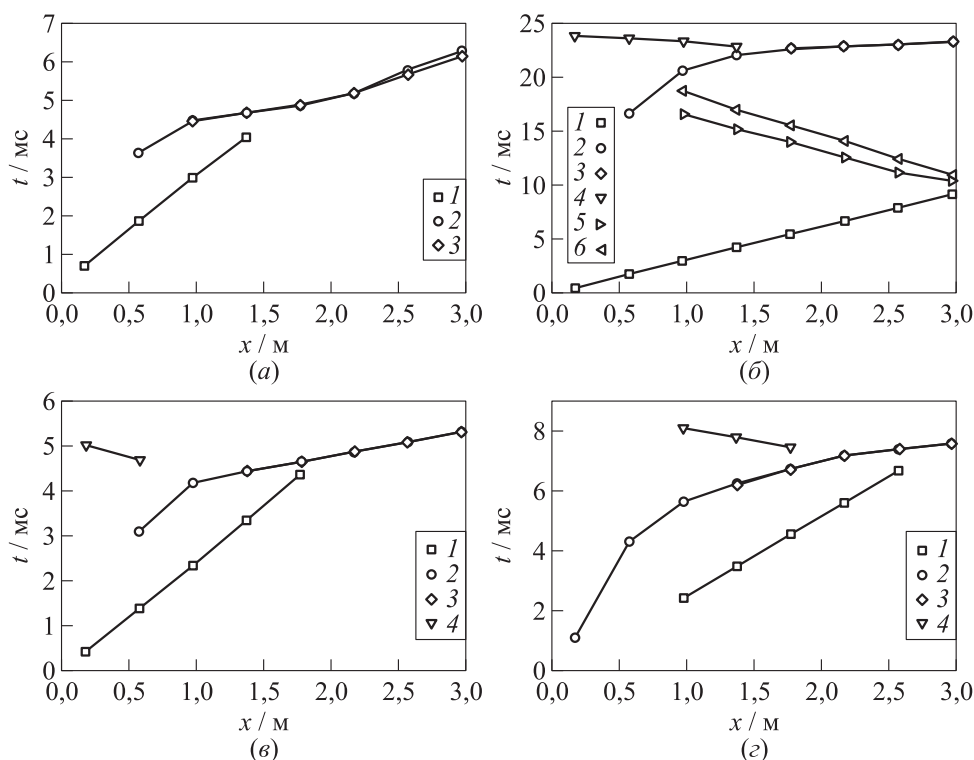




**Рис. 2** Записи ДД1–ДД8 (сплошные кривые) и ФД2–ФД8 (пунктирные кривые) для опыта № 1

и ДД5, расположенных в сечениях 4 и 5 на расстояниях 1,37 и 1,77 м от закрытого конца канала, амплитуда волны давления, бегущей к открытому концу канала, уже достигает 1,5–2 МПа, причем начало отклонения сигналов фотодатчиков ФД4 и ФД5 от нулевой линии совпадает с приходом волны давления в эти сечения. Скорости волны давления (фронта реакции)  $D_{3-4}$  и  $D_{4-5}$  на измерительных базах ДД3–ДД4 (ФД3–ФД4) и ДД4–ДД5 (ФД4–ФД5) составили  $D_{3-4} = 1800$  м/с и  $D_{4-5} = 2020$  м/с соответственно. Совпадение моментов начала сигналов давления и свечения в сечениях 4 и 5, а также уровень скоростей  $D_{3-4}$  и  $D_{4-5}$  свидетельствуют о распространении здесь ДВ с быстрым смесеобразованием за фронтом лидирующей УВ и самовоспламенением образованной топливной смеси. Переход горения в детонацию происходит на расстоянии  $L_* = 1$  м от точки зажигания через время  $T_* = 4,5$  мс после зажигания. Обратим внимание на тот факт, что в месте ПГД сигнал свечения имеет значительно меньшую продолжительность, чем в сформировавшейся ДВ (сравнить сигналы датчиков ФД4 и ФД5). По-видимому, в месте ПГД происходит полное локальное выгорание одного из компонентов топливной смеси — кислорода или паров горючего.

В рассматриваемом примере весь волновой процесс сгорания топливной смеси происходит очень быстро: за  $\sim 6$  мс. Тем не менее, в опыте № 1 наблюдается интересная особенность — смена высокоскоростного режима горения с ДВ на низкоскоростной режим горения с разделенными ударным фронтом и фронтом реакции. Действительно, начиная с сечения 6 на рис. 2 видно некоторое отставание 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

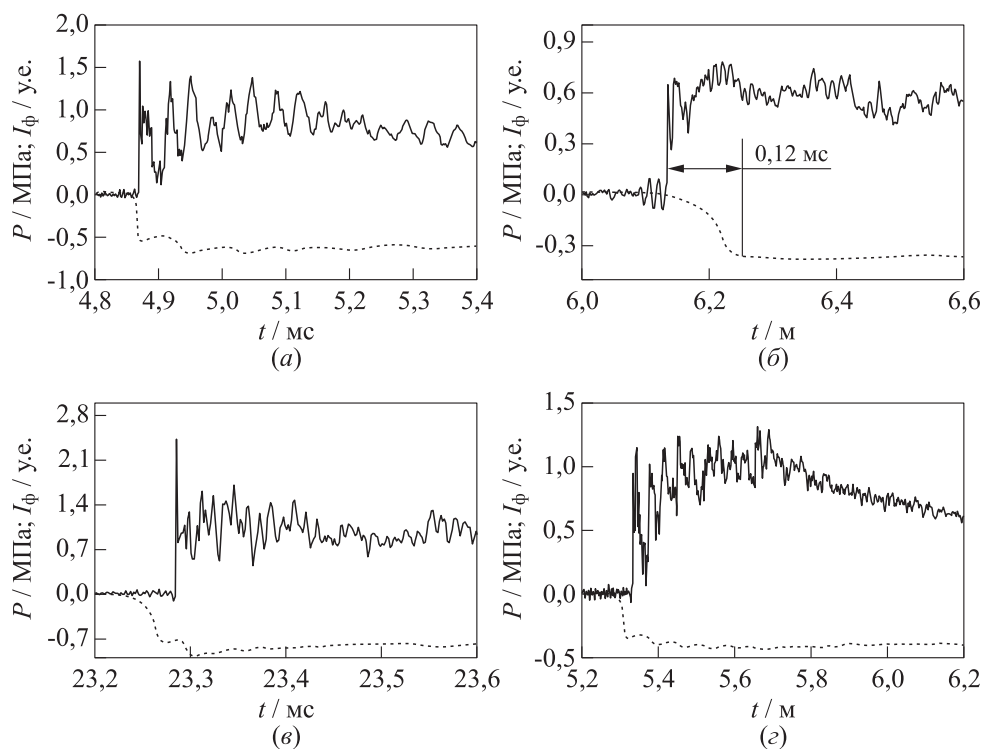


**Рис. 3** Экспериментальные  $x-t$  диаграммы: (а) опыт № 1; (б) № 4; (г) № 12; (з) опыт № 13; 1 — слабая УВ от источника зажигания; 2 — фронт пламени; 3 — ДВ; 4 — волна ретонации; 5–6 — волна разрежения

нельзя с уверенностью утверждать, является ли наблюдаемый низкоскоростной (800–900 м/с) режим распространения фронта реакции устойчивым.

На рис. 3 показаны  $x-t$  диаграммы развития процесса в разных опытах. Для построения таких диаграмм проводился анализ записей давления и свечения датчиками ДД1–ДД8 и ФД1–ФД8 с выделением характерных точек, соответствующих фронтам УВ и ДВ, а также волнам реакции, ретонации и разрежения. Обращаясь к рис. 3, а, построенному для рассматриваемого опыта № 1, видим, 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), а затем (на расстоянии около 2 м) распадается на УВ (кривая 3) и фронт реакции (кривая 2).

На рис. 4 показаны записи ДД и ФД в увеличенном масштабе для разных опытов. Так, для опыта № 1 на рис. 4, а приведены записи сигналов датчиков



**Рис. 4** Записи ДД (сплошные кривые) и ФД (пунктирные кривые) в разных опытах: (а) ДД5 и ФД5, опыт № 1; (б) ДД8 и ФД8, опыт № 1; (в) ДД8 и ФД8, опыт № 4; (г) ДД8 и ФД8, опыт № 12

ДД5 и ФД5, подтверждающие факт образования ДВ. Отчетливо видно, что фронт свечения здесь совпадает с ударным фронтом, т. е. реакция инициируется мощной УВ. Учитывая расположение датчиков ДД5 и ФД5, можно утверждать, что в сечении 5 фронт ДВ практически плоский, по крайней мере до высоты  $\sim 27$  мм над пленкой. Термодинамический расчет параметров детонации стехиометрической смеси н-гептана с кислородом без учета диссоциации дает 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 расчетном значении скорости звука в продуктах детонации, можно оценить частоту поперечных волн по ширине ( $\sim 26$  кГц) и по высоте ( $\sim 12$  кГц) канала. На рис. 4, а частота пульсаций давления за детонационным фронтом составляет 26–32 кГц, т. е. согласуется с верхней оценкой. Однако уровни максимального и среднего давления в ДВ на рис. 4, а ( $\sim 1,5$  и  $\sim 1$  МПа соответственно) оказались заметно ниже расчетного давления.

На рис. 4, б показан участок записи датчиков ДД8 и ФД8 в опыте № 1 вблизи ударного фронта. В сечении 8 в профиле волны давления за ударным фронтом сначала наблюдается спад давления, а затем оно плавно повышается до точки, в которой достигается максимальная интенсивность свечения; далее давление остается приблизительно постоянным. Подобная структура волн давления характерна для фронтов реакции в реагирующих гетерогенных средах, когда за УВ, распространяющейся по газовой фазе, сначала происходят межфазные обменные процессы, приводящие к смесеобразованию, а затем следует воспламенение и энерговыделение, причем продолжительность зоны энерговыделения зависит от макрокинетики горения, включающей скорости и физических, и химических сопутствующих процессов.

Сравнивая записи давления и свечения на рис. 4, б, видим, что задержка воспламенения в сечении 8 приблизительно равна 120 мкс — интервалу времени, коррелирующему с протяженностью зоны реакции в газовой детонации на пределе распространения. Отметим, что за такое время лидирующий ударный фронт в рассматриваемом опыте пробегает расстояние около 10 см, обеспечивая смесеобразование в первоначально стратифицированной системе. Для определения причины кратковременного периода существования ДВ в опыте № 1 с последующей сменой режима распространения фронта реакции требуются дополнительные исследования.

В опытах с энергией зажигания 27 и 52 Дж наблюдался ПГД как с очень короткой продолжительностью преддетонационного периода (например, в опытах № 2 и № 9), 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 существенно изменялись.

Рассмотрим опыт № 4 с энергией зажигания 27 Дж (см. табл. 2). На рис. 3, б представлена  $x-t$  диаграмма процесса ПГД в этом опыте. Видно, что в отличие от опыта № 1, в котором ПГД произошел очень быстро (через  $T_* \sim 4,5$  мс после зажигания на расстоянии  $L_* \sim 1$  м), в опыте № 4 ПГД произошел значительно позже — через  $T_* \sim 23$  мс на расстоянии  $L_* \sim 1,8$  м. В рассматриваемом опыте заметное ускорение фронта пламени (кривая 2) произошло лишь после прихода веера волн разрежения (кривые 5 и 6), образованного при выходе квазиакустической ( $M_0 \approx 1$ ) УВ (кривая 1) через открытый конец канала. После ПГД по направлению к закрытому концу канала распространяется волна ретонации (кривая 4), а по направлению к открытому концу канала распространяется ДВ (кривая 3), причем ее средняя скорость равна  $\sim 1875$  м/с на всех измерительных базах, начиная с сечения 5.

На рис. 4, в приведена запись сигналов датчиков ДД8 и ФД8 в сечении 8, демонстрирующая структуру ДВ в опыте № 4. Можно заметить, что фронт свечения здесь

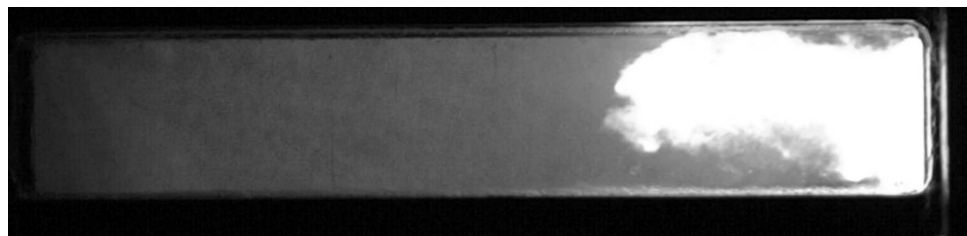
опережает УВ на 13–15 мкс. Имея в виду, что волна давления достигает датчика ДД8 за конечное время, по указанному интервалу времени можно оценить среднюю скорость поперечной волны — 1800–2100 м/с, которая по величине близка к продольной скорости ДВ и значительно выше скорости звука в продуктах детонации. Сделанные оценки дают основание полагать, что к фронту развитой ДВ, бегущей над поверхностью пленки, под углом около  $45^\circ$  примыкает движущаяся в следе косая УВ. Такая структура развитой ДВ несколько отличается от структуры ДВ, возникающей кратковременно в опыте № 1, в которой фронт свечения совпадает с фронтом УВ.

В опыте № 7 с энергией зажигания 52 Дж получен квазистационарный низкоскоростной режим горения с волной давления, распространяющейся со средней скоростью 690–780 м/с, начиная с расстояния порядка 1,5 м. На измерительных базах между сечениями 5 и 8 амплитуда давления в такой волне была на уровне 0,4–0,5 МПа, а фронт свечения отставал от лидирующей УВ на 80–150 мкс, причем по мере удаления волны давления от источника зажигания отставание фронта свечения от УВ в целом не изменялось. Такой режим горения коррелирует с режимом, зарегистрированным в опыте № 1 на последних измерительных базах.

В опыте № 8 с энергией зажигания 52 Дж продолжительность преддетонационного периода была еще больше, чем в опыте № 4, —  $T_* \sim 31$  мс вместо 23 мс, а ПГД произошел на расстоянии  $L_* \sim 1,9$  м вместо  $\sim 1,8$  м. Остальные характеристики процесса были почти такие же, как в опыте № 4.

В экспериментах с относительно большими энергиями зажигания (210 Дж) также зарегистрированы изменения преддетонационного расстояния от опыта к опыту. Так, на рис. 3, в и 3, г приведены  $x-t$  диаграммы для опытов № 12 и № 13. В первом случае ПГД происходил на расстоянии  $L_* \sim 1,1$  м, а во втором — на расстоянии  $L_* \sim 2,1$  м, хотя условия опытов были одинаковыми, а различия в толщине пленки укладывались в погрешность измерений. На самом деле, определить реальную толщину пленки очень сложно даже при тщательных замерах расходов, поскольку неизвестно точное значение площади смачиваемой поверхности вследствие капиллярных эффектов и частичного уноса топлива при продувке канала кислородом.

Можно предположить, что такой разброс в измеренных значениях расстояния и времени ПГД может быть связан со стохастической природой самого явления ПГД в стратифицированной системе «газ–пленка». Несмотря на различия в динамике развития детонационного взрыва, полученные в опытах № 12 и № 13 скорости распространения детонации очень близки, а профили давления и свечения в ДВ выглядят одинаково и сохраняют свою форму. Так, скорость детонации в опыте № 12 на разных измерительных базах составила  $D_{5-6} = 1950$  м/с,  $D_{6-7} = 1820$  м/с и  $D_{7-8} = 1780$  м/с, а в опыте № 13 —  $D_{6-7} = 1950$  м/с и  $D_{7-8} = 2100$  м/с. Небольшое превышение скорости детонации при большей временной задержке ПГД вполне закономерно, поскольку для выхода пересжатой ДВ, образованной при «взрыве во взрыве», на самоподдерживающийся режим необходимо некоторое



(a)



(б)



(в)



(z)

**Рис. 5** Кадры видеорегистрации: (a) 1,2 мс; (б) 2,4; (в) 3,4; (z) 4,0 мс

время. Более того, скорость и структура ДВ не зависят от энергии зажигания: скорость составляет 1800–2000 м/с, т. е. 77%–85% от скорости детонации Чепмена–Жуге, а профили давления и свечения на рис. 4, *г* фактически ничем не отличаются от таковых на рис. 4, *в*.

Для иллюстрации начальной стадии развития детонационного взрыва в системе «газ–пленка» рассмотрим рис. 5. Здесь приведены кадры видеосъемки процесса в опыте с энергией зажигания 190 Дж в канале с присоединенной оптической секцией. В этом опыте ПГД произошел на расстоянии  $L_* \sim 0,9$  м от закрытого конца канала через  $T_* \sim 3,4$  мс после зажигания. Скорость детонации на последней измерительной базе составила 1860 м/с. Первый снимок (рис. 5, *а*) соответствует приходу УВ от взрыва проволоочки на датчик ДД1. Ярко светящееся облако в правой части снимка — это облако продуктов взрыва медной проволоочки, а ярко светящаяся полоска в нижней правой части снимка — пламя, бегущее над жидкой пленкой н-гептана. На втором снимке (рис. 5, *б*) пламя над поверхностью пленки, с одной стороны, уже ушло за левую границу кадра, а с другой — расширилось почти на половину высоты канала. Третий снимок соответствует моменту времени, когда в канале ниже по течению происходит ПГД, однако на данном участке канала это никак не проявилось. Наконец, четвертый снимок (рис. 5, *г*) соответствует моменту прихода волны детонации от «взрыва во взрыве» (яркое свечение у левого края снимка). В целом, видно, что горение в канале развивается в относительно узком слое над пленкой и даже на сравнительно больших временах (1–2 мс) занимает только часть сечения канала. Равномерное свечение по всей высоте канала наблюдается лишь за волной детонации на рис. 5, *г*.

## Заключение

В работе впервые экспериментально зарегистрирован ПГД в системе «газ–пленка» при слабом источнике зажигания, который не генерирует начальную УВ сколь-нибудь значительной интенсивности. В серии опытов с разной энергией зажигания (от 14 до 480 Дж) в прямом гладком канале прямоугольного сечения  $54 \times 24$  мм длиной 3 м с одним открытым концом получен ПГД в системе «газ (кислород) – пленка жидкого топлива (н-гептан)» на расстояниях от 1 до 2 м от источника зажигания за время от 2,6 до 31 мс после момента зажигания. Несмотря на 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. Анализ структуры развитой ДВ дает основание полагать, что к фронту ДВ, бегущему над поверхностью пленки, под углом около  $45^\circ$  примыкает движущаяся в следе косая УВ. Скоростная видеосъемка развития процесса на начальном участке канала показала, что горение в канале развивается в относительно узком слое над жидкой пленкой и даже на сравнительно больших временах, сопоставимых с преддетонационным периодом, занимает только часть сечения канала.

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, разделенные временной задержкой от 80 до 150 мкс.

Полученные результаты будут использованы для организации рабочего процесса в НДКС и ИДКС с подачей жидкого топлива в виде пристеночной пленки.

## Литература

1. Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: Challenges, current status, and future perspective // Prog. Energ. Combust. Sci., 2004. Vol. 30. No. 6. P. 545–672.
2. Войцеховский Б. В. Стационарная детонация // Докл. АН СССР, 1959. Т. 129. № 6. С. 1254–1256.
3. Фролов С. М. Способы организации рабочего процесса в непрерывно-детонационной камере сгорания реактивного двигателя на жидком топливе и устройства для их осуществления. Заявка на патент РСТ/RU2014/000779 от 16.10.2014.
4. Loison R. The propagation of deflagration in a tube covered with an oil film // CR Acad. Sci., 1952. Vol. 234. No. 5. P. 512–513.
5. Гордеев В. Е., Комов В. Ф., Трошин Я. К. О детонационном горении гетерогенных систем // Докл. АН СССР, 1965. Т. 160. № 4. С. 853–856.
6. Комов В. Ф., Трошин Я. К. О структуре и механизме детонации гетерогенных систем // Докл. АН СССР, 1965. Т. 162. № 1. С. 133–135.
7. Комов В. Ф., Трошин Я. К. О свойствах детонации в некоторых гетерогенных системах // Докл. АН СССР, 1967. Т. 175. № 1. С. 109–112.
8. Лесняк С. А., Назаров М. А., Трошин Я. К. К механизму распространения гетерогенной детонации // Докл. АН СССР, 1968. Т. 182. № 5. С. 1122–1125.
9. Лесняк С. А., Назаров М. А., Трошин Я. К. Взаимодействие ударной волны с пленкой вязкой жидкости // Докл. АН СССР, 1968. Т. 183. № 3. С. 628–631.
10. Ragland K. W., Nicholls J. A. Two-phase detonation of a liquid layer // AIAA J., 1969. Vol. 7. No. 5. P. 859–863.
11. Лесняк С. А., Трошин Я. К. Некоторые результаты исследования гетерогенной детонации // Физика горения и взрыва, 1970. Т. 6. № 4. С. 560–564.
12. Sichel M., Rao C. S., Nicholls J. A. A simple theory for the propagation of film detonations // 13th Symposium (International) on Combustion Proceedings. Pittsburgh, PA, USA: The Combustion Institute, 1971. P. 1141–1149.
13. Rao C. S., Sichel M., Nicholls J. A. Two dimensional theory for two phase detonations of the liquid films // Combust. Sci. Technol., 1972. Vol. 4. No. 5. P. 209–216.
14. Лесняк С. А., Слуцкий В. Г. Одномерная диффузионная модель гетерогенной (газ–пленка) детонации // ПМТФ, 1974. Т. 15. № 3. С. 86–95.
15. Воробьев М. В., Лесняк С. А., Назаров М. А., Трошин Я. К. Неустойчивость границы раздела газ–жидкость за фронтом ударной волны, скользящей вдоль поверхности пленки жидкости // Доклады АН СССР, 1976. Т. 227. № 4. С. 900–903.



16. Воробьев М. В., Лесняк С. А., Назаров М. А., Трошин Я. К. Разрушение пленки вязкой жидкости потоком ударно-сжатого газа // Докл. АН СССР, 1976. Т. 230. № 2. С. 344–346.
17. Воробьев М. В., Лесняк С. А., Назаров М. А., Трошин Я. К. Воспламенение гетерогенных (газ–пленка) систем ударными волнами // Докл. АН СССР, 1976. Т. 231. № 1. С. 119–122.
18. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Шернаев С. М., Тимофеев Е. И. О механизме смесеобразования за ударной волной, скользящей по поверхности жидкости // Физика горения и взрыва, 1981. Т. 17. № 5. С. 86–93.
19. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е., Тимофеев Е. И. Взаимодействие пленки жидкости с высокоскоростным газовым потоком за ударной волной // Физика горения и взрыва, 1984. Т. 20. № 5. С. 107–114.
20. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е., Борисов А. А. Простая модель детонации в системе газ–пленка с учетом механического уноса горючего // Физика горения и взрыва, 1985. Т. 21. № 1. С. 110–117.

Поступила в редакцию 18.03.16

---

---

## DEFLAGRATION-TO-DETONATION TRANSITION IN “OXYGEN – LIQUID *n*-HEPTANE FILM” SYSTEM

S. M. Frolov<sup>1,2,3</sup>, V. S. Aksenov<sup>1,2,3</sup>, and I. O. Shamshin<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

<sup>2</sup>N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

**Abstract:** Deflagration-to-detonation transition (DDT) in “gas-film” system with a weak ignition source, which does not generate the initial shock wave (SW) of any significant intensity, has been registered experimentally apparently for the first time. In a series of experiments with different ignition energy (14 to 480 J) in a straight smooth-walled 3-meter long channel of rectangular 54 × 24 mm cross section with one open end, the DDT in “gas (oxygen) – liquid fuel (*n*-heptane) film” system was obtained at run-up distances of 1 to 2 m from the ignition source with run-up times of 2.6 to 31 ms after ignition. Despite some differences in the dynamics of detonation onset from experiment to experiment, both with different and with the same ignition energy, the measured velocity of arising detonation wave (DW) was 1800–2000 m/s (77%–85% of the Chapman–Jouguet velocity) and did not depend on the ignition energy, while registered pressure and luminosity profiles in the DW retained their shape. Analysis of the DW structure indicates that at the top of the leading front of the DW running over the liquid-film surface, there is an adjacent oblique shock wave inclined at an angle of about 45°. High-speed videorecording of DDT process development at the initial section of the channel showed that combustion occurs in the channel in a relatively

thin layer over the liquid film and even on a relatively large time period comparable with the DDT run-up time combustion occupies only a part of channel cross section. In some experiments, a quasi-stationary low-speed detonation-like combustion fronts propagating at an average velocity of 700–900 m/s were detected apparently for the first time. The structure of these fronts includes a leading SW followed by a reaction zone separated from each other by a time delay of 80 to 150  $\mu$ s.

**Keywords:** liquid fuel film; oxygen; deflagration-to-detonation transition; combustion modes; experiment; high-speed video

## Acknowledgments

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 15-08-00782).

## References

1. Roy, G. D., S. M. Frolov, A. A. Borisov, and D. W. Netzer. 2004. Pulse detonation propulsion: Challenges, current status, and future perspective. *Prog. Energ. Combust. Sci.* 30(6):545–672.
2. Voitsekhovskii, B. V. 1959. Stacionarnaya detonatsiya [Stationary detonation]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 129(6):1254–1256.
3. Frolov, S. M. 2014. Sposoby organizatsii rabotcheho protsessa v nepreryvno-detonatsionnoy kamere sgoraniya reaktivnogo dvigatelya na zhidkom toplive i ustroystva dlya ikh osushchestvleniya [Methods of operation process organization in a continuous-detonation combustion chamber of liquid-fueled jet engine and devices for their implementation]. Patent Application PCT/RU2014/000779 dated 16.10.2014.
4. Loison, R. 1952. The propagation of deflagration in a tube covered with an oil film. *CR Acad. Sci.* 234(5):512–513.
5. Gordeev, V. E., V. F. Komov, and Ya. K. Troshin. 1965. O detonatsionnom gorenii geterogennykh system [On detonative combustion of heterogeneous systems]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 160(4):853–856.
6. Komov, V. F., and Ya. K. Troshin. 1965. O strukture i mekhanizme detonatsii geterogennykh system [On the structure and mechanism of detonation of heterogeneous systems]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 162(1):133–135.
7. Komov, V. F., and Ya. K. Troshin. 1967. O svoystvakh detonatsii v nekotorykh geterogennykh sistemakh [On detonation properties in some heterogeneous systems]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 175(1):109–112.
8. Lesnyak, S. A., M. A. Nazarov, and Ya. K. Troshin. 1968. K mekhanizmu rasprostraneniya geterogennoy detonatsii [To the propagation mechanism of heterogeneous detonation]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 182(5):1122–1125.
9. Lesnyak, S. A., M. A. Nazarov, and Ya. K. Troshin. 1968. Vzaimodeystvie udarnoy volny s plen-koy vyazkoy zhidkosti [Interaction of a shock wave with viscous liquid film]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 183(3):628–631.
10. Ragland, K. W., and J. A. Nicholls. 1969. Two-phase detonation of a liquid layer. *AIAA J.* 7(5):859–863.

11. Lesnyak, S. A., and Ya. K. Troshin. 1970. Certain results of an investigation of heterogeneous detonation. *Combust. Expl. Shock Waves* 6(4):483–486.
12. Sichel, M., C. S. Rao, and J. A. Nicholls. 1971. A simple theory for the propagation of film detonations. 13th Symposium (International) on Combustion Proceedings. Pittsburgh, PA: The Combustion Institute. 1141–1149.
13. Rao, C. S., M. Sichel, and J. A. Nicholls. 1972. Two dimensional theory for two phase detonations of the liquid films. *Combust. Sci. Technol.* 4(5):209–216.
14. Lesnyak, S. A., and V. G. Slutskii. 1974. One-dimensional diffusional model of heterogeneous (gas–film) detonation. *J. Appl. Mech. Techn. Phy.* 15(3):355–362.
15. Vorobiev, M. V., S. A. Lesnyak, M. A. Nazarov, and Ya. K. Troshin. 1976. Neustoychivost' granitsy razdela gaz–zhidkost' za frontom udarnoy volny, skol'zyashchey vdol' poverkhnosti plenki zhidkosti [Instability of gas–liquid interface behind a shock wave sliding over the surface of liquid film]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 227(4):900–903.
16. Vorobiev, M. V., S. A. Lesnyak, M. A. Nazarov, and Ya. K. Troshin. 1976. Razrushenie plenki vyazkoy zhidkosti potokom udarno-szhatogo gaza [Destruction of viscous liquid film by the flow of shock-compressed gas]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 230(2):344–346.
17. Vorobiev, M. V., S. A. Lesnyak, M. A. Nazarov, and Ya. K. Troshin. 1976. Vosplamnenie geterogennykh (gaz–plenka) sistem udarnymi volnami [Ignition of heterogeneous (gas–film) systems by shock waves]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 231(1):119–122.
18. Borisov, A. A., B. E. Gel'fand, S. M. Sherpanev, and E. I. Timofeev. 1981. Mechanism for mixture formation behind a shock sliding over a fluid surface. *Combust. Expl. Shock Waves* 17(5):558–563.
19. Frolov, S. M., B. E. Gel'fand, and E. I. Timofeev. 1984. Interaction of a liquid film with a high-velocity gas flow behind a shock wave. *Combust. Expl. Shock Waves* 20(5):573–579.
20. Frolov, S. M., B. E. Gel'fand, and A. A. Borisov. 1985. Simple model of detonation in a gas–film system with consideration of mechanical fuel removal. *Combust. Expl. Shock Waves* 21(1):104–110.

Received March 18, 2016

## Contributors

**Frolov Sergey M.** (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; scientific head, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

**Aksenov Victor S.** (b. 1952) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; engineer, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991,

Russian Federation; associate professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; v.aksenov@mail.ru

**Shamshin Igor O.** (b. 1975) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; specialist, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; associate professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; shamshin@idgcenter.ru