

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

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

**Аннотация:** Впервые экспериментально зарегистрирован переход горения в детонацию (ПГД) в системе «газ (кислород) – пленка жидкого n-декана» при слабом источнике зажигания. В серии экспериментов с зажиганием взрывающейся проволокой, которое генерирует слабую первичную ударную волну (УВ) с числом Маха от 1,03 до 1,4 в прямом гладком канале прямоугольного сечения  $54 \times 24$  мм длиной 3 и 6 м с одним открытым концом получен ПГД на расстояниях от 1 до 4 м от источника зажигания за время от 3 мс до 1,7 с от момента зажигания. Переход горения в детонацию получен для относительно «толстых» пленок толщиной 0,3–0,5 мм, что соответствует коэффициенту избытка горючего  $\varphi = 20\text{--}40$ . Скорость детонации составила 1400–1700 м/с. В ряде опытов зарегистрирован низкоскоростной квазистационарный детонационноподобный фронт горения, бегущий со средней скоростью 700–1100 м/с, структура которого включает лидирующую УВ и следующую за ним зону реакции, разделенные временной задержкой от 90 до 190 мкс. Полученные результаты важны для организации рабочего процесса в непрерывно-детонационных и импульсно-детонационных камерах сгорания перспективных ракетных и воздушно-реактивных двигателей с подачей жидкого топлива в виде пристеночной пленки.

**Ключевые слова:** переход горения в детонацию; стратифицированная система «газ–пленка»; слабое зажигание; детонационный двигатель

### Введение

В отличие от известных экспериментальных исследований (см., например, [1–4]), в которых детонацию в системе «газ–пленка» инициировали мощными источниками, в работах [5–7] для инициирования детонации использовался слабый источник зажигания в виде взрывающейся проволоки.

Эксперименты в [5–7] показали, что в системе «кислород – пленка жидкого n-гептана» в прямом гладком канале прямоугольного сечения  $54 \times 24$  мм длиной 3 м с одним открытым концом возможен ПГД на расстояниях от 1 до 2 м за время от 3,4 до 30 мс с момента зажигания. При этом взрывающаяся проволока генерирует очень слабую первичную УВ с числом Маха до  $\sim 1,2$ . 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) в опытах [5–7] не зависела от энергии зажигания и составляла 1800–2000 м/с, а профили давления и свечения в ДВ сохраняли свою форму. В ряде опытов наблюдался низкоскоростной квазистационарный детонацион-

ноподобный режим горения, распространяющийся со средней скоростью 700–900 м/с, структура которого включала лидирующую УВ и следующую за ней протяженную зону турбулентного горения, разделенную временной задержкой 80–150 мкс. Хотя опыты в [5–7] проводились в стратифицированной системе при нормальных условиях, все же давление насыщенных паров n-гептана при комнатной температуре (4,4 кПа) достаточно для образования слоя гомогенной горючей смеси (коэффициент избытка горючего  $\varphi = 0,5$ ), в котором может распространяться детонация. Поэтому для оценки влияния паровой фазы горючего на механизм ПГД необходимо провести сравнительное исследование с менее летучими углеводородными горючими.

Цель данной работы — продолжить экспериментальные исследования, начатые в [5–7], используя вместо летучего n-гептана значительно менее летучий n-декан. По сравнению с n-гептаном давление насыщенных паров n-декана при комнатной температуре в 40–60 раз меньше и составляет всего 0,1 кПа. Указанные исследования важны для организации рабочего процесса в непрерывно-детонационных и импульсно-детонационных камерах

\* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 15-08-00782) и РНФ (грант № 14-13-00082П).

<sup>1</sup> Институт химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», igor.shamshin@mail.ru

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

<sup>3</sup> Институт химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru

сгорания перспективных ракетных и воздушно-реактивных двигателей.

## Экспериментальная установка и методика измерений

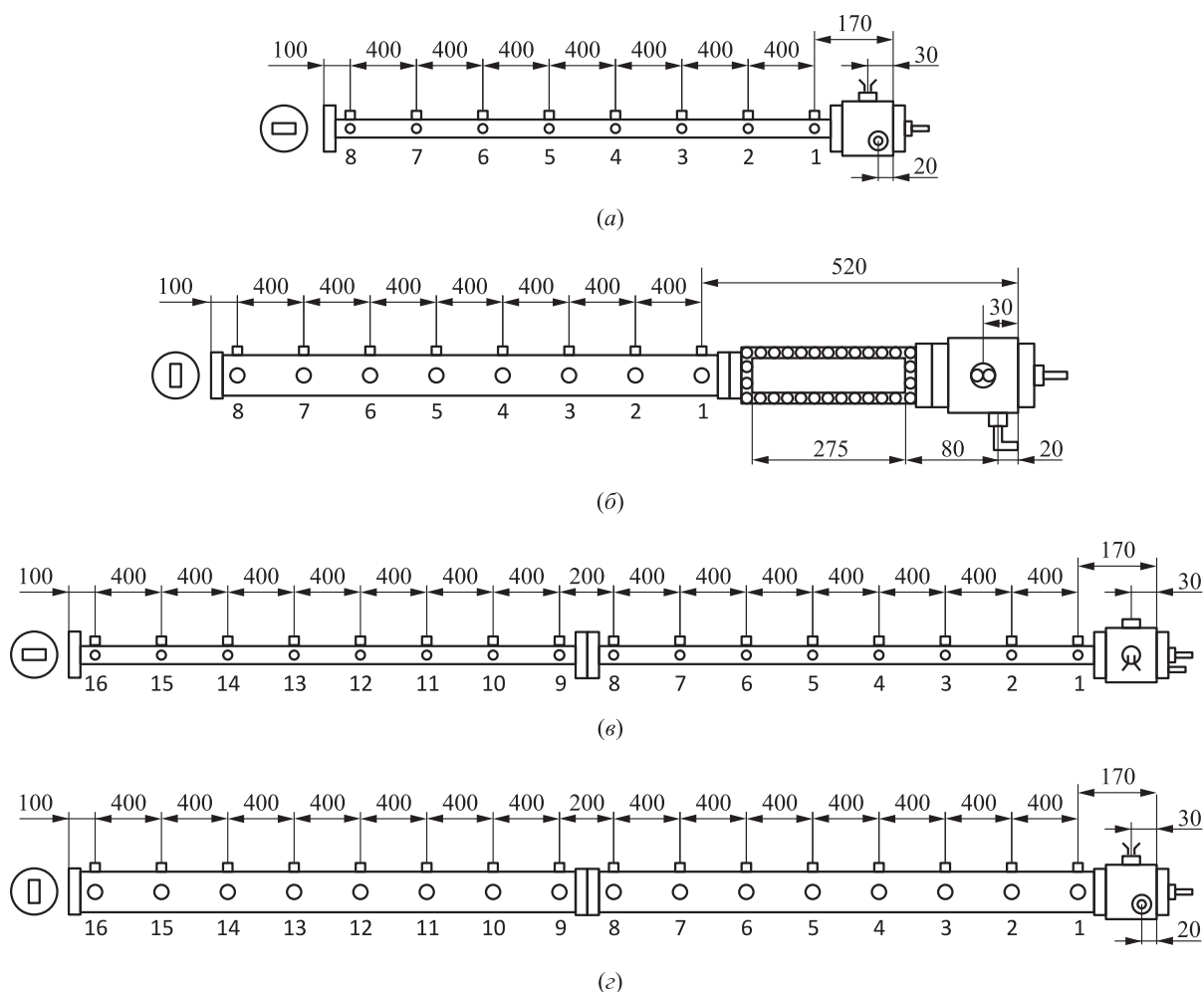
Исследования ПГД в системе «газ–пленка» выполнены на экспериментальной установке, подробно описанной в [5]. Там же детально описана методика измерений. Здесь дадим лишь краткое описание установки и методики.

На рис. 1 представлены четыре конфигурации основного элемента экспериментальной установки — детонационного канала прямоугольного сечения  $24 \times 54$  мм. В экспериментах используются два расположения канала (показаны в кружках сле-

ва): в виде канала шириной 54 мм и высотой 24 мм (далее — «широкий» канал, рис. 1, а и 1, в) и в виде канала шириной 24 мм и высотой 54 мм (далее — «узкий» канал, рис. 1, б и 1, г). Длина каналов либо 3 м (далее — «короткий» канал, рис. 1, а и 1, б), либо 6 м (далее — «длинный» канал, рис. 1, в и 1, г). Канал наклонен на угол  $3^\circ$  к горизонту.

Жидкое горючее (н-декан) подается в канал через ряд капилляров, расположенных в 20 мм от закрытого торца (на рис. 1 — справа), и благодаря растеканию жидкости на нижней стенке канала образуется тонкая пленка. Время подачи жидкого горючего в канал подбирается так, чтобы нижняя стенка канала была смочена пленкой по всей длине.

Газообразный кислород подается в канал с расходом 10 л/мин в объеме, соответствующем не менее чем 5-кратному объему трубы.



**Рис. 1** Схема детонационного канала: (а) канал высотой 24 мм, шириной 54 мм и длиной 3 м; (б) канал высотой 54 мм, шириной 24 мм и длиной 3 м с оптической секцией; (в) канал из двух секций длиной 3 м, высотой 24 мм и шириной 54 мм; (г) канал из двух секций длиной 3 м, высотой 54 мм и шириной 24 мм. Размеры указаны в миллиметрах

Зажигание производится медной проволокой диаметром 130 мкм и длиной 6 мм, размещаемой над поверхностью пленки у закрытого торца и взрываваемой с помощью замыкания через нее электрической цепи с накопительной емкостью (конденсатором). Изменение емкости конденсатора от 25 до 6900 мкФ и напряжения на нем от 120 до 380 В позволяет варьировать энергию зажигания от 0,2 до 500 Дж с погрешностью не более 10%.

Развитие процесса горения в канале регистрируется фотодиодами (ФД) и высокочастотными датчиками давления (ДД), установленными вдоль канала, причем в каждом измерительном сечении ФД и ДД установлены на смежных стенках канала (см. нумерацию измерительных сечений на рис. 1). В узком канале, изображенном на рис. 1, б, в дополнение к регистрации самосвечения фронта реакции и давления может проводиться видеозапись теневой картины развития процесса на начальном участке канала с помощью скоростной видеокамеры через оптическое окно длиной 275 мм и высотой 50 мм.

## Результаты экспериментов в коротком канале

В табл. 1 и 2 представлены результаты экспериментов в широком (см. табл. 1) и узком (см. табл. 2)

**Таблица 1** Результаты опытов в 3-метровом широком канале 54 × 24 мм

Эксперимент	$\delta_f$ , мм	$M_0$	$L_*$ , м	$T_*$ , мс	$\bar{D}$ , м/с	Режим
1	0,35	1,03	2,5	1068	—	Д
2	0,52	1,10	1,3	47	1690	Д
3	0,47	1,14	1,4	77	1440	Д
4	0,27	1,38	0,9	2,8	1400	Д
5	0,29	1,51	1,5	3,2	1510	Д
6	0,18	1,21	—	—	900	ВГ
7	0,16	1,34	—	—	1050	ВГ
8	0,13	1,06	—	—	~75	Г
9	0,38	1,06	—	—	~10	Г
10	0,38	1,07	—	—	~40	Г
11	0,18	1,17	—	—	~80	Г
12	0,19	1,14	—	—	~150	Г

**Таблица 2** Результаты опытов в 3-метровом узком канале 24 × 54 мм

Эксперимент	$\delta_f$ , мм	$M_0$	$L_*$ , м	$T_*$ , мс	$\bar{D}$ , м/с	Режим
1	0,31	1,14	—	—	1030	ВГ
2	0,65	1,47	—	—	770	ВГ
3	0,78	1,09	—	—	~70	Г
4	0,65	1,04	—	—	~10	Г
5	0,68	1,12	—	—	~80	Г

коротких каналах. В таблицах указаны: номер эксперимента; средняя толщина пленки горючего  $\delta_f$ , рассчитанная по массе топлива, поданного в канал; число Маха УВ  $M_0$ , генерируемой при зажигании (средняя скорость УВ на измерительной базе между сечениями 1 и 4); измеренные значения преддетонационного расстояния  $L_*$  и времени  $T_*$ ; измеренное значение средней скорости фронта реакции  $\bar{D}$ , определяемой средним значением на установившемся участке или значением на последней измерительной базе для неустановившегося режима, и обозначение зарегистрированного режима горения: Д — детонация; ВГ — высокоскоростное горение; Г — медленное горение. Погрешность определения скорости фронта реакции — не более 3%.

Важнейший экспериментальный результат — регистрация ПГД в системе «газ — пленка жидкого н-декана» при слабом источнике зажигания. Переход горения в детонацию зарегистрирован только в широком канале (см. табл. 1) при числе Маха первичной УВ, генерируемой взрывающейся проволокой,  $M_0 = 1,03-1,51$  (эксперименты 1–5 в табл. 1) и при толщине пленки  $\delta_f = 0,3-0,5$  мм. При минимальных значениях энергии зажигания, при которых зарегистрирован ПГД, число Маха первичной УВ  $M_0 < 1,15$  (эксперименты 1–3), т. е. интенсивность первичной УВ очень мала. Измеренные значения преддетонационного расстояния  $L_*$  и времени  $T_*$  в экспериментах 1–5 составили 0,9–2,5 м и 2,8–1068 мс соответственно, а средняя скорость детонации  $\bar{D} = 1400-1700$  м/с. В узком канале той же длины при близких значениях  $M_0$  и  $\delta_f$  детонация не возникла (см. табл. 2).

На рис. 2 для примера показаны записи ДД в экспериментах 1 и 2 из табл. 1. В опыте 1 (рис. 2, а), судя по профилю и амплитуде волны давления, ПГД произошел в самом конце трубы в окрестности измерительного сечения 8 (см. рис. 1, а) приблизительно через 1 с после зажигания. Фронт свечения, зарегистрированный ФД в этом же измерительном сечении (на рис. 2 не показан), практически совпадает с фронтом УВ (задержка прихода фронта свечения в это сечение не превышает 15 мкс). Большое значение преддетонационного времени  $T_*$  означает, что на процесс ПГД может оказывать влияние истечение газа через открытый конец канала, т. е. длина канала в эксперименте 1 недостаточна для надежного вывода о возможности ПГД. В отличие от эксперимента 1, в эксперименте 2 ПГД произошел не в конце, а в середине канала, на расстоянии около 1,3 м от источника зажигания за относительно короткое время (47 мс) после зажигания. Судя по пространственно-временной диаграмме волновых процессов в эксперименте 2 (рис. 3, а) и по

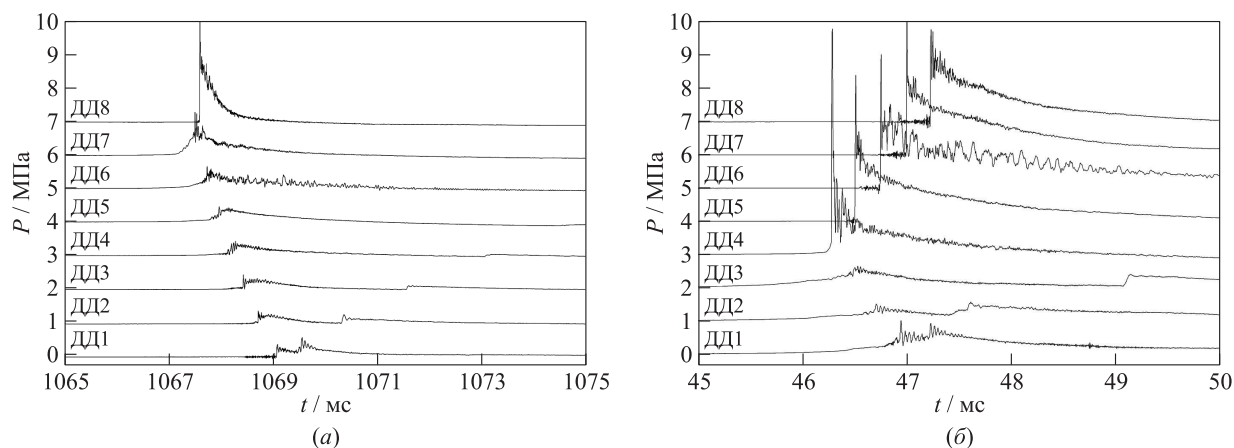


Рис. 2 Осциллограммы давления в экспериментах 1 (а) и 2 (б) (см. табл. 1)

измеренным зависимостям скоростей распространения фронтов волн давления и свечения (рис. 3, б), открытый конец канала в этом эксперименте также влияет на ускорение пламени и ПГД. При этом на рис. 3, б можно выделить четыре этапа эволюции пламени: медленное распространение на расстоянии до 0,5 м от источника зажигания, ускоренное распространение на интервале длины от 0,5 до 1,2 м до достижения околосвуковой скорости ( $\sim 300$  м/с), скачкообразное ускорение до ПГД при  $L_* \approx 1,3$  м и дальнейшее распространение до конца канала в виде ДВ.

Увеличение числа Маха первичной УВ (эксперименты 4 и 5 в табл. 1) приводит к резкому сокращению преддетонационного времени до 2,8–3,2 мс. В этих условиях открытый конец канала уже, очевидно, не влияет на ПГД, хотя преддетонационное расстояние остается на уровне 1–1,5 м,

т. е. ПГД происходит в середине канала. Отметим, что в экспериментах местоположение и время ПГД определяются по пространственно-временной диаграмме (см. рис. 3, а) по пересечению траекторий волн детонации и ретонации. Процесс ПГД сопровождается образованием сильной УВ с амплитудой выше 6,8 МПа (максимальное значение давления для используемых ДД – РСВ 113В24, см., например, запись датчика ДД4 на рис. 2, б). Детонация в экспериментах идентифицируется по одновременному (с задержкой не более 15 мкс) приходу волн давления и свечения в то или иное измерительное сечение, а также по скорости распространения выше 1400 м/с.

Уменьшение толщины пленки при прочих близких условиях приводит к невозможности ПГД: вместо детонации в канале возникает либо режим высокоскоростного горения (ВГ) со скоростью

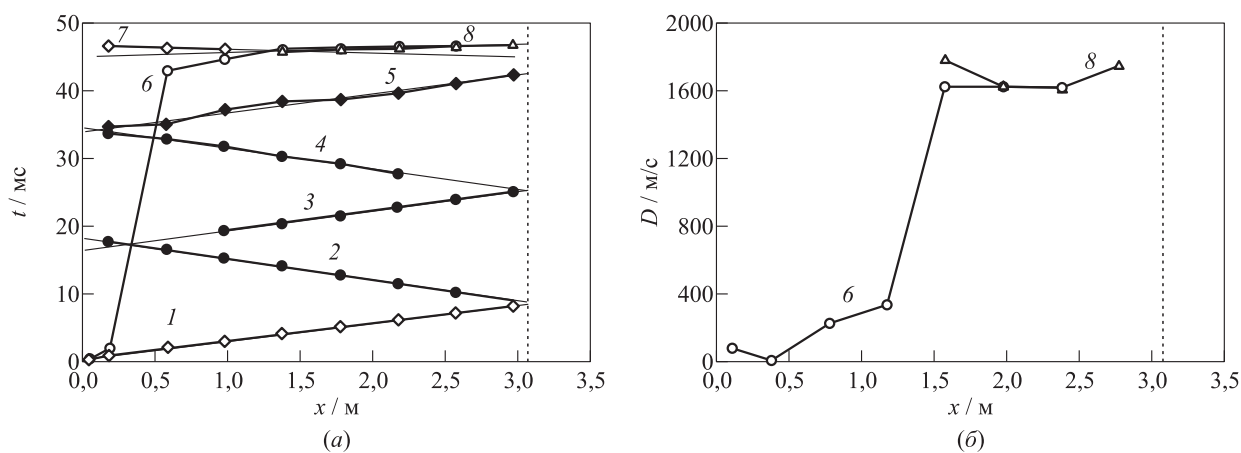


Рис. 3 Пространственно-временная диаграмма (а) и зависимость скоростей фронтов давления и свечения (б) для эксперимента 2 (см. табл. 1): 1 – фронт УВ; 2 – фронт волны разрежения; 3, 4 и 5 – фронты акустической волны; 6 – фронт свечения (пламени); 7 – фронт волны ретонации; 8 – фронт ДВ

распространения от 700 до 1100 м/с, либо режим медленного горения (Г) со скоростью до 150 м/с. Режим ВГ, зарегистрированный в системе «кислород – пленка жидкого н-декана», имеет много общего с низкоскоростным квазистационарным детонационноподобным фронтом горения, наблюдаемым в [5–7] в системе «кислород – пленка жидкого н-гептана»: он распространяется с такими же видимыми скоростями, а его структура включает лидирующую УВ и следующую за ней зону реакции, разделенные временной задержкой от 90 до 190 мкс.

## Результаты экспериментов

### в длинном канале

В табл. 3 и 4 представлены результаты экспериментов в широком (табл. 3) и в узком (табл. 4) длинных каналах (см. рис. 1, *в* и 1, *г* соответственно). В них указаны те же параметры, что и в табл. 1 и 2.

**Таблица 3** Результаты опытов в 6-метровом широком канале 54 × 24 мм

Эксперимент	$\delta_f$ , мм	$M_0$	$L_*$ , м	$T_*$ , мс	$\bar{D}$ , м/с	Режим
1	0,40	1,14	3,9	1231,5	1635	Д
2	0,35	1,14	4,4	1603	1580	Д
3	0,35	1,14	4,7	1656,8	1560	Д
4	0,39	1,14	4,4	1159	1795	Д
5	0,40	1,13	4,1	1309,5	1710	Д

**Таблица 4** Результаты опытов в 6-метровом узком канале 24 × 54 мм

Эксперимент	$\delta_f$ , мм	$M_0$	$L_*$ , м	$T_*$ , мс	$\bar{D}$ , м/с	Режим
1	0,43	1,43	1,5	5,2	1645	Д
2	0,52	1,32	2,3	6,5	1570	Д
3	0,40	1,38	1,5	6	1460	ВГ↑Г
4	0,46	1,17	2,8	57	1120	ВГ
5	0,43	1,39	1,4	5	805	ВГ
6	0,47	1,24	1,6	10	980	ВГ
7	0,42	1,19	2,0	9	825	ВГ
8	0,48	1,44	1,4	4,5	970	ВГ
9	0,48	1,37	1,4	5,5	835	ВГ
10	0,41	1,38	1,4	5,5	800	ВГ
11	0,43	1,34	1,5	7	910	ВГ
12	0,44	1,27	1,8	9,7	815	ВГ
13	0,57	1,33	1,4	6	825	ВГ
14	0,43	1,35	1,4	5,5	800	ВГ
15	0,44	1,34	1,7	9,5	825	ВГ
16	0,43	1,42	1,3	4,3	790	ВГ
17	0,48	1,41	1,5	6	800	ВГ
18	0,51	1,03	—	—	~ 25	Г
19	0,47	1,17	—	—	~ 20	Г

Эксперименты в длинном канале подтвердили возможность ПГД в системе «газ – пленка жидкого н-декана» при слабом источнике зажигания. В отличие от экспериментов в коротком канале здесь ПГД зарегистрирован и в широком (см. табл. 3), и в узком (см. табл. 4) длинных каналах. В широком канале эксперименты проведены с  $M_0 = 1,13–1,14$  (эксперименты 1–5 в табл. 3) и при толщине пленки  $\delta_f = 0,35–0,40$  мм, т. е. в условиях, близких к экспериментам 2 и 3 в широком коротком канале (см. табл. 1), и продемонстрировали хорошую воспроизводимость результатов. Измеренные значения преддетонационного расстояния  $L_*$  и времени  $T_*$  в экспериментах 1–5 в табл. 3 составили 3,9–4,7 м и 1,2–1,7 с соответственно, а средняя скорость детонации  $\bar{D} = 1600–1800$  м/с. В узком длинном канале ПГД наблюдался при большей интенсивности первичной УВ  $M_0 \approx 1,3–1,4$  с пленками н-декана толщиной  $\delta_f = 0,4–0,5$  мм (см. табл. 4), причем в этом случае измеренные значения преддетонационного расстояния  $L_*$  и времени  $T_*$  в экспериментах 1 и 2 в табл. 4 составили 1,5–2,3 м и 5,2–6,5 мс соответственно.

На рис. 4 для примера показаны записи ДД и ФД в эксперименте 5 из табл. 3. Заметное повышение давления здесь наблюдается, только начиная с датчика ДД11, расположенного на расстоянии 3967 мм от закрытого торца канала, когда видимая скорость пламени в окрестности этого датчика уже достаточно велика (~ 1300 м/с). На следующем датчике (ДД12) наблюдается волна давления с крутым фронтом и с амплитудой 5,4 МПа, причем волны давления и свечения приходят в данное измерительное сечение одновременно. На датчике ДД13 амплитуда волны давления уменьшается до 4,3 МПа, однако приход фронта свечения по-прежнему совпадает с приходом УВ.

Рисунок 4 дополняется данными рис. 5, на котором построена зависимость видимой скорости фронта свечения от пройденного расстояния для того же эксперимента в широком длинном канале. Здесь возникновению детонации ( $L_* \approx 4,1$  м) предшествовал длительный период распространения пламени с низкой скоростью (от 2 до 10 м/с), который сменился стадией быстрого ускорения пламени. Интересно, что эта стадия начинается в середине канала на расстоянии 2,5–3 м от источника зажигания.

Наблюдаемая закономерность заметного ускорения горения в середине трубы может быть связана с взаимодействием волны горения с акустическими колебаниями. Отметим, что при смене способа зажигания взрывающейся проволочкой на использование нити накаливания во всех опытах

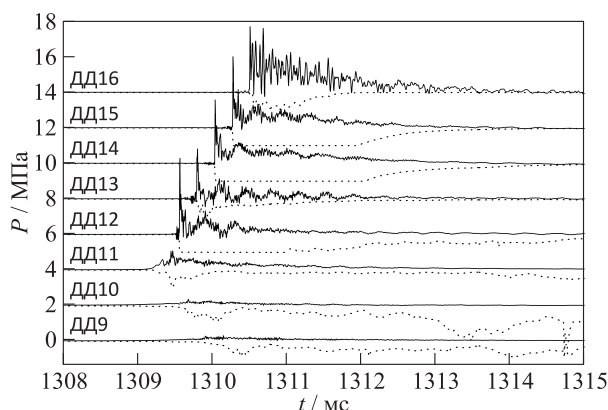


Рис. 4 Записи ДД (сплошные кривые) и ФД (точки) в эксперименте 5 (см. табл. 3)

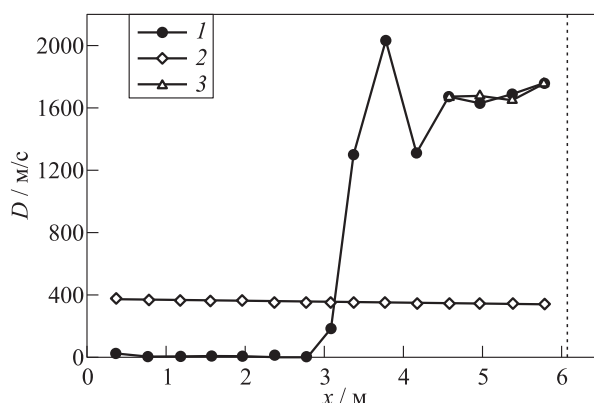


Рис. 5 Скорость фронта пламени (1), УВ (2) и ДВ (3) в эксперименте 5 (см. табл. 3)

без инициирования начального акустического возмущения наблюдался только режим медленного горения ( $\Gamma$ ) с видимой скоростью 1–3 м/с и в коротком, и в длинном каналах.

На рис. 6 показан пример записей ДД и ФД в эксперименте 1 из табл. 4, т. е. в эксперименте в узком длинном канале. По этим записям построен рис. 7, показывающий пространственно-временную диаграмму волнового процесса (рис. 7, а) и зависимости скоростей волн давления и реакции от пройденного расстояния (рис. 7, б). В этом эксперименте пленка n-декана имела толщину  $\delta_f = 0,43$  мм, первичная УВ имела интенсивность  $M_0 \approx 1,43$ , а измеренные значения преддетонационного расстояния  $L_*$  и времени  $T_*$  составили 1,5 м и 5,2 мс соответственно.

На записях рис. 6 можно видеть, как по мере ускорения пламени увеличивается крутизна фронтов волн давления и образуются УВ. На датчике ДД4 в момент времени 4,74 мс можно видеть образование одной из УВ. Эту же волну можно проследить на датчике ДД5 в момент времени 5,16 мс, за которой формируется еще одна УВ в момент времени 5,21 мс, а за ней в момент времени 5,23 мс наблюдается резкий подъем давления и свечения. На рис. 7, а этому моменту времени соответствует расстояние около 1,7–1,8 м — точка, в которой сходятся две УВ и далее распространяется одна волна — ДВ. Амплитуда волны давления в этой точке — месте установки датчика ДД5, который находится на расстоянии 1,77 м от источника зажигания, — превышает 6 МПа, а длительность — меньше 20 мкс. За подъемом давления следуют резкий спад давления и его колебания с частотой около 25 кГц, соответствующие поперечным волнам, распространяющимся перпендикулярно поверхности пленки.

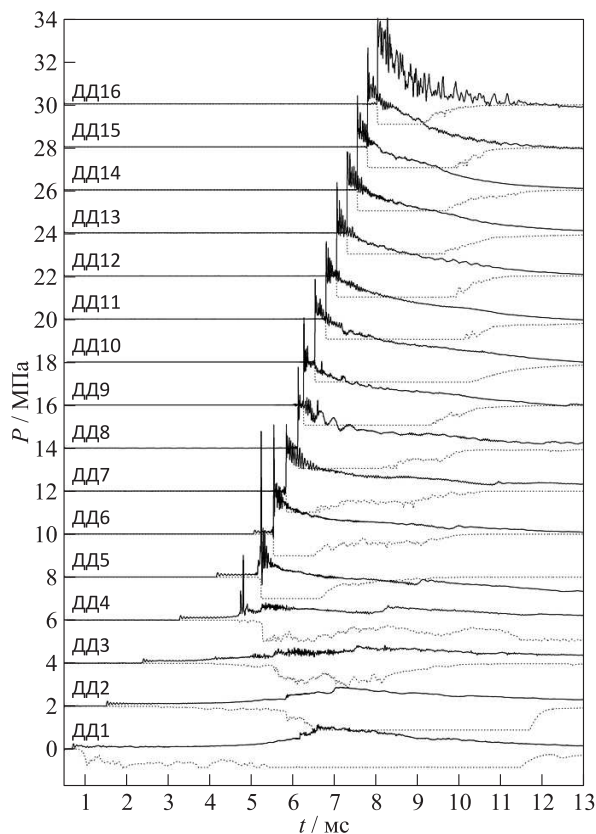
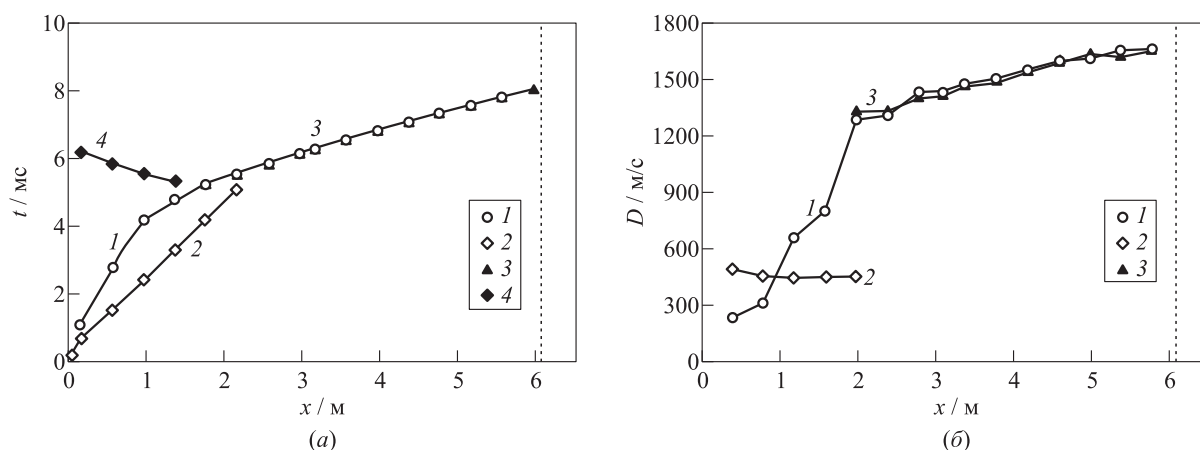


Рис. 6 Записи ДД (сплошные кривые) и ФД (точки) в эксперименте 1 (см. табл. 4)

После выхода детонации на квазистационарный режим распространения со скоростью  $\sim 1600$  м/с профиль давления в ней сохраняется: за фронтом имеются колебания давления с частотой 18–24 кГц, т. е. присутствует волна давления, распространяющаяся в поперечном направлении с амплитудой 0,5–1,0 МПа. Отметим, что эта ам-



**Рис. 7** Пространственно-временная диаграмма (а) и зависимость скоростей фронтов давления и свечения (б) для эксперимента 1 (см. табл. 4): 1 — фронт реакции; 2 — фронт УВ; 3 — фронт ДВ; 4 — фронт волны ретонации

плитуда значительно больше амплитуды акустических колебаний, наблюдаемых за фронтом волны давления при ВГ-режиме (на уровне 0,1 МПа). Свечение за фронтом ДВ настолько интенсивное, что сигналы ФД зашкаливают в течение 2–3 мс, и судить о характере изменения свечения за детонационным фронтом не представляется возможным.

## Заключение

В работе впервые экспериментально зарегистрирован ПГД в системе «газ (кислород) — пленка жидкого н-декана» при слабом источнике зажигания. В серии экспериментов с зажиганием взрывающейся проволокой, которое генерирует слабую первичную УВ с числом Маха от 1.03 до 1.4 в прямом гладком канале прямоугольного сечения  $54 \times 24$  мм длиной 3 и 6 м с одним открытым концом получен ПГД на расстояниях от 1 до 4 м от источника зажигания за время от 3 мс до 1,7 с от момента зажигания. Переход горения в детонацию получен для пленок н-декана толщиной 0,3–0,5 мм, что соответствует коэффициенту избытка горючего  $\varphi = 20\text{--}40$ . Измеренная скорость детонации составила 1400–1700 м/с.

В ряде опытов зарегистрирован низкоскоростной квазистационарный детонационноподобный фронт горения, бегущий со средней скоростью 700–1100 м/с, структура которого включает лидирующую УВ и следующую за ним зону реакции, разделенные временной задержкой от 90 до 190 мкс.

Полученные результаты важны для организации рабочего процесса в непрерывно-детонационных и импульсно-детонационных камерах сгорания перспективных ракетных и воздушно-реактивных двигателей с подачей жидкого топлива в виде пристеночной пленки.

## Литература

1. Loison R. The propagation of deflagration in a tube covered with an oil film // *C. R.*, 1952. Vol. 234. № 5. P. 512–513.
2. Комов В. Ф., Трошин Я. К. О свойствах детонации в некоторых гетерогенных системах // Докл. АН СССР, 1967. Т. 175. № 1. С. 109–112.
3. Ragland K. W., Nicholls J. A. Two-phase detonation of a liquid layer // *AIAA J.*, 1969. Vol. 7. No. 5. P. 859–863.
4. Sichel M., Rao C. S., Nicholls J. A. A simple theory for the propagation of film detonations // *Proc. Combust. Inst.*, 1971. Vol. 13. P. 1141–1149.
5. Фролов С. М., Аксёнов В. С., Шамшин И. О. Переход горения в детонацию в системе «кислород — пленка жидкого н-гептана» // *Горение и взрыв*, 2016. Т. 9. № 3. С. 92–111.
6. Фролов С. М., Аксёнов В. С., Шамшин И. О. Переход горения в детонацию в системе газ — пленка жидкого горючего // Докл. РАН, 2017. Т. 474. № 4. С. 448–453.
7. Фролов С. М., Аксёнов В. С., Шамшин И. О. Переход горения в детонацию в стратифицированной системе кислород — пленка жидкого топлива // *Хим. физика*, 2017. Т. 36. № 6. С. 34–44.

Поступила в редакцию 29.12.16

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

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

<sup>1</sup>N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

<sup>3</sup>Scientific Research Institute for System Studies, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovskii Prosp., Moscow 117218, Russian Federation

**Abstract:** Deflagration-to-detonation transition (DDT) in the system “gas (oxygen) – liquid *n*-decane film” was obtained experimentally for the first time using a weak ignition source. In a series of experiments with ignition by an exploding wire that generates a weak primary shock wave with Mach numbers ranging from 1.03 to 1.4 in a straight smooth channel of rectangular cross section  $54 \times 24$  mm, 3- and 6-meter long with one open end, the DDT is obtained at distances 1 to 4 m from the ignition source 3 ms to 1.7 s after ignition. The DDT is obtained for *n*-decane films 0.3–0.5 mm thick, which corresponds to the fuel-to-oxygen equivalence ratios of 20–40. The registered detonation velocity was 1400–1700 m/s. In a number of experiments, a low-velocity quasi-stationary detonation-like combustion front propagating at an average velocity of 700–1100 m/s was recorded. The structure of this front includes the leading shock wave followed by the reaction zone separated from each other by a time delay of 90 to 190  $\mu$ s. The results obtained are important for better understanding of the operation process in the continuous-detonation and pulse-detonation combustors of advanced rocket and air-breathing engines with the supply of liquid fuel in the form of a wall film.

**Keywords:** deflagration-to-detonation transition; stratified gas–film system; weak ignition; detonation engine

## Acknowledgments

This work was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 15-08-00782) and Russian Science Foundation (grant No. 14-13-00082P).

## References

- Loison, R. 1952. The propagation of deflagration in a tube covered with an oil film. *C. R.* 234(5):512–513.
- Komov, V. F., and Ya. K. Troshin. 1967. O svoystvakh detonatsii v nekotorykh geterogennykh sistemakh [On the properties of detonation in some heterogeneous systems]. *Dokl. USSR Acad. Sci.* 175(1):109–112.
- Ragland, K. W., and J. A. Nicholls. 1969. Two-phase detonation of a liquid layer. *AIAA J.* 7(5):859–863.
- Sichel, M., C. S. Rao, and J. A. Nicholls. 1971. A simple theory for the propagation of film detonations. *Proc. Combust. Inst.* 13:1141–1149.
- Frolov, S. M., V. S. Aksenov, and I. O. Shamshin. 2016. Perekhod goreniya v detonatsiyu v sisteme “kislород – plenka zhidkogo *n*-geptana” [Deflagration-to-detonation transition in “oxygen – liquid *n*-heptane film” system]. *Goren. Vzryv (Mosk.) – Combustion and Explosion* 9(3):92–111.
- Frolov, S. M., V. S. Aksenov, and I. O. Shamshin. 2017. Deflagration-to-detonation transition in the gas – liquid-fuel film system. *Dokl. Phys. Chem.* 474(2):93–98.
- Frolov, S. M., V. S. Aksenov, and I. O. Shamshin. 2017. Perekhod goreniya v detonatsiyu v stratifitsirovannoy sisteme kislород – plenka zhidkogo topliva [Deflagration-to-detonation transition in a stratified system oxygen – liquid fuel film]. *Russ. J. Phys. Chem. B* 36(6):34–44.

Received December 29, 2016



## Contributors

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

**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; professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; senior research scientist, Scientific Research Institute for System Studies, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovskii Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru