

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ
СКОРОСТЕЙ ТУРБУЛЕНТНЫХ
И ЛАМИНАРНЫХ ПЛАМЕН
ПРИ ВЫСОКОЙ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

УДК 534.222.2+536.46

В. И. Манжалей, В. А. Субботин

**Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск**

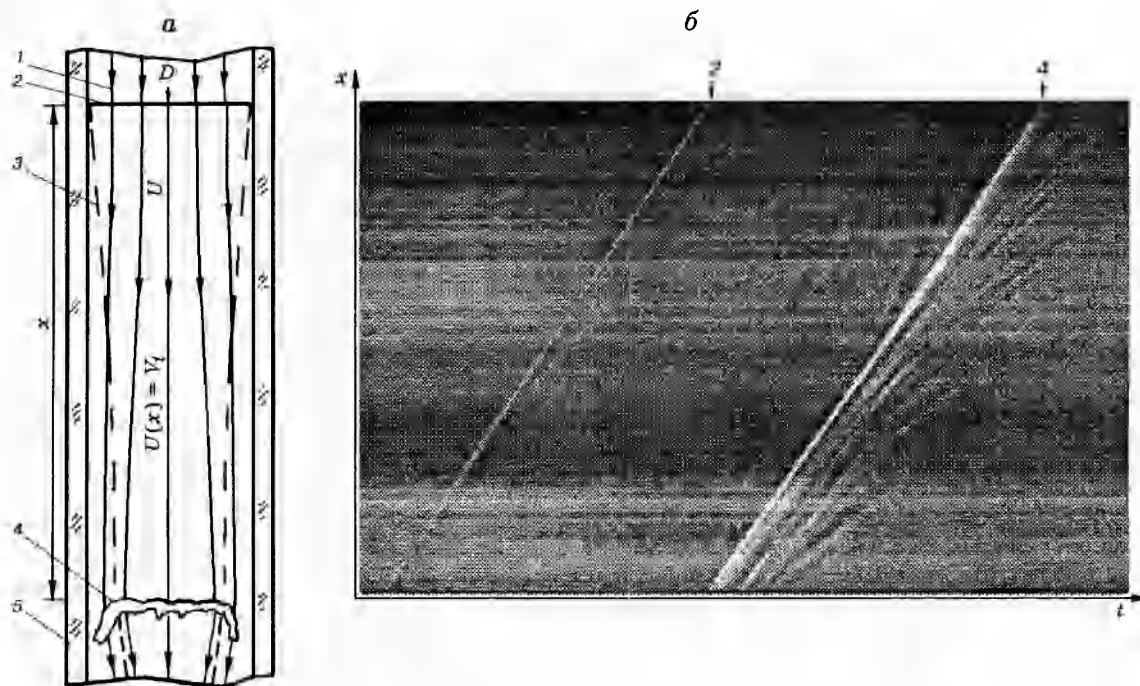
Обнаружена низкоскоростная детонация, в которой самовоспламенение отсутствует, а турбулентное пламя удерживается за ведущим ударным скачком на расстоянии нескольких диаметров канала из-за «отсоса» газа в турбулентный пограничный слой на стенке трубы. Структура такой детонации оказалась в основном совпадающей со структурой низкоскоростной детонации в капилляре, где пограничный слой ламинарный. Расчеты расстояния от ударной волны до пламени согласуются с экспериментом. Предлагается использовать его экспериментальное значение для определения скорости пламен в нетурбулентном газе, нагретом ударной волной, в условиях экстремально коротких задержек воспламенения. Области существования по начальному давлению многофронтной и низкоскоростной детонаций частично перекрываются.

Цель этой статьи — обратить внимание на возможность определения скоростей пламен газовых смесей в экстремальных условиях, используя измерения скорости и характерного размера недавно расшифрованной структуры низкоскоростной детонации [1–3].

В структуре низкоскоростной детонации газа в гладком капилляре или трубе [1–3] фронт воспламенения отстоит от ударного скачка на 4–6 калибров канала d и имеет выпуклую форму (периферийная часть пламени отстает от центральной на величину до $3d$). Структура волны приблизительно стационарна, а скорость D лежит в интервале 0,45–0,6 от идеальной скорости детонации Чепмена — Жуге и растет с начальным давлением p_0 .

Волна распространяется по следующему механизму: в системе отсчета, связанной с волной, отсос газа из ядра потока в пограничный слой на стенках трубы (движущихся быстрее газа относительно ударной волны (УВ)) приводит к замедлению скорости U центральной части потока до нормальной скорости пламени V_n . В точке на оси, где достигается условие $U = V_n$, пламя стабилизируется относительно ведущей УВ. Периферийные слои потока сгорают в косом пламени внутри пограничного слоя. Трубки тока в дозвуковом потоке за прямым пламенем вниз по потоку сжимаются, а газ ускоряется до скорости звука в сечении трубы, совпадающем с концом косого пламени в пограничном слое; давление при этом падает. Движение газа за большей частью косого пламени в пограничном слое сверхзвуковое и с уменьшением давления вниз по потоку линии тока расходятся.

Опыты по расшифровке структуры низкоскоростной детонации [1–3] проводились в капиллярах диаметром 0,6, 1,0 и 2,0 мм со смесью $C_2H_2 + 2,5O_2$. Такая детонация наблюдалась при меньшем значении p_0 , чем спиновая и галопирующая детонации. Число



Структура низкоскоростной детонации с турбулентным пламенем (а) и теплеровская развертка в круглой трубе (б), $p_0 = 20$ Торр:

1 — линии тока; 2 — ударная волна; 3 — граница пограничного слоя; 4 — пламя; 5 — стенка трубы

Рейнольдса в сечении трубки у начала пламени $Re = D(\sigma - 1)^2 x \rho_0 / \mu \approx 2 \cdot 10^5$ меньше критического $Re_* \approx 5 \cdot 10^5$, поэтому пограничный слой в опытах [1, 2] был ламинарным (здесь σ — отношение плотностей в ударном скачке, x — расстояние от УВ до пламени, ρ_0 — плотность смеси перед УВ, μ — динамическая вязкость). Отметим, что и ранее в гладких трубах иногда отмечали низкие скорости предельной детонации [4–6]. По-видимому, в этих случаях также реализовалась структура низкоскоростной детонации с «отсосом» газа в турбулентный [4, 5] или ламинарный [6] пограничный слой (рисунок а).

Эксперименты по регистрации режимов детонации выполнены в трубе с внутренним диаметром $d = 27$ мм и длиной 3 м. В смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ при слабом инициировании (конденсатор 2 мкФ, 10 кВ, в энергию УВ переходило $\approx 0,2\%$) получен низкоскоростной режим детонации в диапазоне $20 < p_0 < 100$ Торр. При более мощном (на 3–4 порядка по энергии УВ) инициировании навеской азиды свинца массой 0,1 г наблюдалась спиновая детонация при $40 < p_0 < 50$ Торр, при большем давлении — двухголовый спин и многофронтная детонация. Таким образом, опыты четко обнаруживают двойственность режимов детонации по p_0 . По теплеровским фоторазверткам (рисунок б) измеряли скорость ударной волны D и видимую скорость пламени, а также расстояние (x/d) между УВ и пламенем. В анализируемых опытах УВ и пламя образовывали квазистационарный комплекс: на длине оптической секции трубы видимая скорость пламени совпадала со скоростью УВ в пределах точности их измерения (2%).

Сравнение с теорией проводилось следующим образом. По измеренной скорости УВ вычисляли параметры за ней, а затем (с использованием развитой в [7] теории турбулентного пограничного слоя за УВ в трубе) рассчитывали расстояние x^* , на котором поток газа

p_0 , Торр	D , м/с	(x/d)	V_i , м/с	π	(x/d)	V_i , м/с	T , К ($\gamma = 1,3$)	V_i , м/с
Эксперимент				Расчет				
20	1240	5,5	68	13,4	3,73	116	806	18
26	1220	5,0	92	13,0	4,07	115	789	18
65	1680	2,15-3,2	168	24,7	2,27	184	1246	39
77	1580	2,5	177	21,8	2,71	170	1135	33

Примечание. π — отношение давлений на ударном скачке.

остановился бы за стационарной УВ. Расстояние от УВ до места стабилизации пламени связано с координатой остановки потока

$$x = x^*(1 - \sigma V_i/D)^{5/4}. \quad (1)$$

Турбулентную скорость пламени V_i задавали зависимостью [8]

$$V_i/V_l = C_7 U_0'/V_l + C_3 \psi(\beta) \ln(V_l L_{\max}/(C_1 a \beta)), \quad (2)$$

где $V_l = 3,3(T/T_0)^{1,7}$ м/с [9, 10] — скорость ламинарного пламени; $C_1 = 2,0$; $C_3 = 1,0$; $C_7 = 1,4$; $L_{\max} \simeq 4\delta$ — максимальный масштаб возмущений; a — температуропроводность газа перед пламенем; U_0' — пульсационная составляющая скорости; $\delta = \delta(x)$ — толщина пограничного слоя; $\psi(\beta) = ((\beta + 1 - 1/\beta)^{0,5} - 1)\beta/(\beta + 1)$, $\beta = T_f/T$; $T_0 = 293$ К; T — температура перед пламенем; $T_f \simeq 3000$ К — температура пламени. Первый член в (2) описывает влияние турбулентности набегающего потока, второй связан с неустойчивостью пламени, с генерируемой пламенем турбулентностью. Сумма скоростей газа (в лабораторной системе отсчета) и пламени максимальна на внешней границе пограничного слоя. На ней первый член в (2) $C_7 U_0' \simeq 0,01 C_7 D(1 - 1/\sigma) \simeq 10$ м/с на порядок меньше второго. Поэтому влияние турбулентности в пограничном слое на скорость горения газа в потоке за УВ мало. Ведущая точка пламени лежит на границе пограничного слоя; турбулентное пламя в потоке в среднем должно быть слегка вогнутым из-за расхождения линий тока, а в пограничном слое — косым. Расчетные безразмерные расстояния (x/d) и данные эксперимента приведены в таблице.

Формулу (1) можно использовать для получения значений V_i по измеренным (x/d) и D . Экспериментальная скорость пламени V_i (см. таблицу) в двух первых опытах не слишком близка к вычисленной по соотношению (2), так как на расстоянии $\sim 0,3x$ от ударного скачка до пламени пограничный слой был ламинарным, что не учитывалось в расчетах. В целом же совпадение эксперимента с теорией хорошее. Кроме того, при анализе экспериментальных данных по структуре низкоскоростной детонации в капиллярах [1-3] также отмечалась близость измеренных и рассчитанных расстояний от УВ до пламени. Эти факты позволяют считать теоретическую интерпретацию правильной и пригодной для извлечения данных по скоростям ламинарного горения и турбулентного горения в малотурбулентном потоке в экстремальных условиях, а именно при температурах, для которых задержка самовоспламенения порядка нескольких микросекунд в ламинарной низкоскоростной детонации в капиллярах и десятков микросекунд в турбулентной низкоскоростной детонации в трубах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-013-17602).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Manzhalei V. I.** Gaseous detonation in capillaries // 13th Int. Coll. on Dynamics of Explosions and Reactive Systems: Abstr. and Informations, Nagoya Japan: Nagoya Int. Center, 1991.
2. **Манжалей В. И.** Режимы детонации газа в капиллярах // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 3. С. 93–100.
3. **Манжалей В. И.** Физическая модель низкоскоростной детонации в газе // Тез. Всесоюз. симпоз. «Газодинамика взрывных и ударных волн, детонационного и сверхзвукового горения»; Алма-Ата, 1991. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1991.
4. **Ubelohde A. R., Munday G.** Some current problems in the marginal detonation of gases // 12th Symp. (Int.) on Combustion. Pittsburgh, Pennsylvania: Combustion Institute, 1989. P. 809.
5. **Dupre G., Knystautas R., Lee J. H.** Near-limit propagation on detonation in tubes // 10th Int. Coll. on Dynamics of Explosions and Reactive Systems. Berkeley, Calif., 1985.
6. **Paillard C.** Etude de la propagation et de l'extinction des flames de simple decomposition // Thèse de Doctorat des Sciences Physiques. Orléans, France, 1973.
7. **Майрелс Г.** Ограничение работы ударной трубы из-за турбулентного пограничного слоя на стенке // РТК. 1964. Т. 2, № 1. С. 114.
8. **Кузнецов В. Р., Сабельников В. А.** Турбулентность и горение. М.: Наука, 1986.
9. **Льюис Б., Эльбе В.** Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1968.
10. **Основы горения углеводородных топлив** / Под ред. Л. Н. Хитрина, В. А. Попова. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.

*Поступила в редакцию 23/1 1995 г.,
в окончательном варианте — 9/II 1995 г.*
