

Рис. 3. Качественная зависимость скорости горения баллиститного пороха от градиента температуры в к-фазе у поверхности.

мулам работы [4] показывают, что скорость горения заметно изменяется лишь на базах  $\sim l$ . Впрочем, при  $p=5$  атм  $l \approx 80$  мкм, т. е. близка к минимальной базе в наших измерениях (100 мкм). Таким образом, по крайней мере для низких давлений слабое отличие  $u_{кр}$  от  $u$  установлено.

На рис. 3 представлен график, показывающий качественный ход изменения скорости горения в зависимости от  $\varphi_k$  в квазистационарном приближении и узкой зоне химических реакций в к-фазе (кривая А—В) и изменения параметров  $u$  и  $\varphi_k$  при погасании пороха Н на подложке (прямая В—Г) по данным наших измерений (для начального режима В).

Полученное расхождение показывает необходимость учета реальной кинетики реакции в к-фазе при анализе погасания пороха на подложке.

Авторы благодарят Б. В. Новожилова за дискуссию, А. Д. Марголина и В. Г. Крупкина — за предоставление установки для исследования горения в поле ускорений, В. И. Домбровского — за помощь в проведении экспериментов.

Поступила в редакцию  
13/XII 1976

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Новиков, П. Ф. Похил и др. Докл. АН СССР 1968, 180, 6, 1391.
2. С. С. Новиков, Ю. С. Рязанцев. ПМТФ, 1968, 4, 79.
3. С. С. Новиков, Ю. С. Рязанцев. ПМТФ, 1969, 2, 93.
4. О. И. Нефедова, С. С. Новиков и др. ПМТФ, 1970, 2, 85.
5. В. С. Берман, С. С. Новиков, Ю. С. Рязанцев. ПМТФ, 1972, 1, 23.
6. А. А. Зенин, О. И. Лейпунский и др. ФГВ, 1976, 12, 2, 179.
7. А. А. Зенин. Канд. дис. М., ИХФ АН СССР 1962.
8. Ю. С. Шмоткин. Дипломная работа. М., ИХФ АН СССР — МТФИ, 1975.
9. А. А. Зенин, О. И. Лейпунский. ФГВ, 1967, 3, 1, 45.
10. Б. В. Новожилов. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М., «Наука», 1973.
11. Я. Б. Зельдович, О. И. Лейпунский, В. Б. Либрович. Теория нестационарного горения пороха. М. «Наука», 1975.
12. А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин. ФГВ, 1975, 11, 5, 702.
13. В. И. Юхвид, Э. И. Максимов и др. ФГВ, 1974, 10, 1, 28.
14. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1964, 157, 2, 412.
15. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1966, 2, 1, 47.
16. А. А. Зенин, Б. В. Новожилов. ФГВ, 1973, 9, 2, 246.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАМЕНИ КОАКСИАЛЬНОЙ ГОРЕЛКИ МЕТОДАМИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

А. Е. Давыдов, В. С. Аbruков, С. А. Аbruков,  
Н. А. Тарасов, Ф. Т. Денисов

(Чебоксары)

Система коаксиальной горелки представляет собой модель реальной камеры релаксационного вибрационного горения. К данному типу горения можно отнести процессы, происходящие в выхлопной трубке [1], в банке Рейнета [2], в топочных устройствах [3], в кольцевой ка-

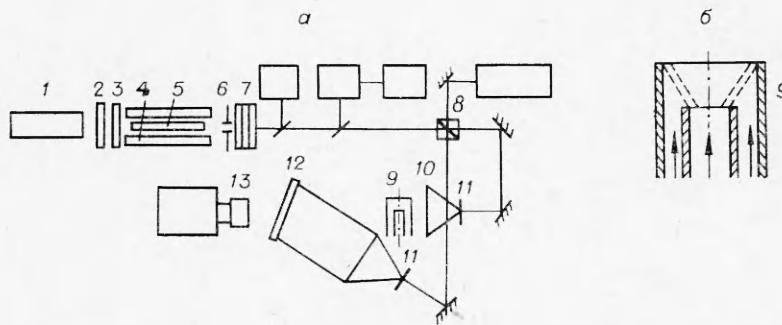


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — лазер ЛГ-56; 2 — заднее зеркало резонатора; 3 — пассивный затвор; 4 — лампы накачки; 5 — активный элемент; 6 — диафрагма; 7 — выходное зеркало; 8 — светоделитель; 9 — коаксиальная горелка; 10 — диффузный рассеиватель; 11 — микрообъектив; 12 — голограмма; 13 — кинокамера СКС-1М;  $\alpha < 1$  — зона недостатка окислителя,  $\alpha > 1$  — зона избытка окислителя.

мере пульсирующего горения [4]. Они характеризуются определяющей ролью в процессах горения гидродинамических параметров, низкой частотой пульсаций, большим пиком давления, а также тем, что пламя в таких устройствах можно рассматривать как сложную нестационарную фазовую неоднородность, находящуюся в замкнутом объеме. Это обуславливает возможность применения в исследовании таких типов горения методов интерферометрии.

Методы классической интерферометрии требуют наличия плоскопараллельных оптических стекол в стенках камеры, что в большинстве случаев искажает гидродинамику системы, делает невозможным расчет интерферограмм [5]. Вследствие нагрева стенок камеры пламенем возникают технические трудности в выравнивании оптических путей в обеих ветвях интерферометра. Эти трудности могут быть преодолены методами голографии. В [6] показана принципиальная возможность таких исследований. Голографическим методом двойной экспозиции с диффузным рассеивателем в рабочем пучке исследована простая фазовая неоднородность, находящаяся в прозрачной камере произвольной формы (тепловые потоки в лампе накаливания). В [7—8] для изучения быстропротекающих процессов в прозрачных камерах (разряд в импульсной лампе, взрыв проволоочки) применена голографическая киноинтерферометрия на основе диффузной подсветки. Использовался метод реального масштаба времени по схеме с рубиновым лазером, синхронизированным с СФР. Продолжительность фильма ограничена длительностью импульса лазера 40 нс.

Цель настоящей работы — исследование возможностей методов голографической интерферометрии с диффузным рассеивателем как новых экспериментальных средств для изучения мгновенной структуры пламени коаксиальной горелки и изменения структуры пламени во времени. В первом случае использовался метод двойной экспозиции, во втором — метод реального масштаба времени. На рис. 1 приведена объединяющая оба метода схема голографического интерферометра, собранного в лабораторных условиях. Исследуемая система состоит из двух концентрически расположенных трубок, срезы которых смещены относительно друг друга на некоторое расстояние. В данном случае внутренние диаметры трубок 18,5 и 9,0 мм, расстояние между срезами 11 мм (см. рис. 1). По внутренней трубке подается горючий газ, по кольцевому зазору между стенками внутренней и внешней трубок — воздух. Согласно [9], причина колебаний пламени состоит в периодическом накоплении и частичном сгорании горючей смеси в промежутке между срезами трубок.

В качестве горючего газа в экспериментах использовался технический пропан, контроль и регулировка расхода газа и воздуха осуществлялись реометрами и кранами. Расходы составляли соответственно 0,55 и 6,3 см<sup>3</sup>/с.

Для съемки голографического интерференционного кинофильма в качестве когерентного источника света использован непрерывный одномодовый газовый лазер ЛГ-38, для получения мгновенных интерферограмм — ОКГ на рубине. На первой стадии в обоих случаях на фотопластинке (ЛОИ 2-063 или Микрат-ВРЛ) регистрировалась световая волна, прошедшая через нагретую пламенем коаксиальную горелку сразу же после гашения пламени прекращением подачи горючего газа и воздуха.

На этапе съемки интерференционного фильма методом реального масштаба времени в рабочий пучок вводился светофильтр КС-13 (для выравнивания амплитуд рабочего и опорного пучков) и зажигалась коаксиальная горелка. С помощью скоростной кинокамеры СКС-16-1М (скорость съемки 322 кадр/с, пленка А-2 чувствительностью 500 ед. ГОСТа) фиксировалась световая волна, прошедшая через коаксиальную горелку, находящуюся в рабочем режиме, и проявленную на том же месте, где она экспонировалась. Таким образом, получены интерференционные полосы, соответствующие только колеблющемуся пламени коаксиальной горелки с исключением излишней информации о нагреве стекол камеры и конвективном потоке от камеры.

Для получения мгновенных интерферограмм на фотопластинке, зафиксировавшей на первой стадии излишнюю информацию, на второй стадии фиксировался рабочий режим коаксиальной горелки. Затем на этапе восстановления с помощью лазера ЛГ-38 также выделялись интерференционные полосы, соответствующие только пламени коаксиальной горелки.

Качественный анализ голографического интерференционного фильма позволил подробно рассмотреть нестационарные процессы, протекающие как в области над срезом внешней трубки, так и во внутренней области. Общая продолжительность периода ( $T=0,15$  с) 48 кадров. Параметры, на основе которых рассматривались нестационарные процессы в коаксиальной горелке (плотность и конфигурация интерференционных полос), определяются распределением температуры и химическим составом рассматриваемого объема. Можно выделить следующие подпериоды колебания: 1) подготовка горючей смеси в области между срезами трубок; 2) прорыв внешнего пламени и частичное сгорание подготовленной смеси; 3) догорание подготовленной смеси. Отмеченные подпериоды, в свою очередь, состоят из нескольких разнохарактерных процессов.

Малая мощность непрерывного He—Ne лазера ЛГ-38 не позволила проиллюстрировать подпериоды кадрами интерференционного фильма. В качестве иллюстрации можно рассматривать ряд мгновенных интерферограмм, полученных с помощью значительно более мощного рубинового лазера (рис. 2) и интерпретированных с помощью голографического интерференционного фильма.

Рассмотрим далее каждый из указанных подпериодов. Время приводится в секундах и в единицах периода —  $T$ .

1. Продолжительность подпериода  $t_{01}=0,099с=0,66 T$ . В этот подпериод продукты сгорания предшествующего периода вытесняются горючим газом и воздухом. В результате их смешивания в области  $B$  между срезами трубок образуется горючая смесь с неоднородным распределением соотношения газ — воздух. На рис. 2, *a* видны интерференционные полосы, соответствующие продуктам сгорания предшествующего периода (они деформируются и исчезают за время  $t_{11}=0,04с=0,26T$ ),

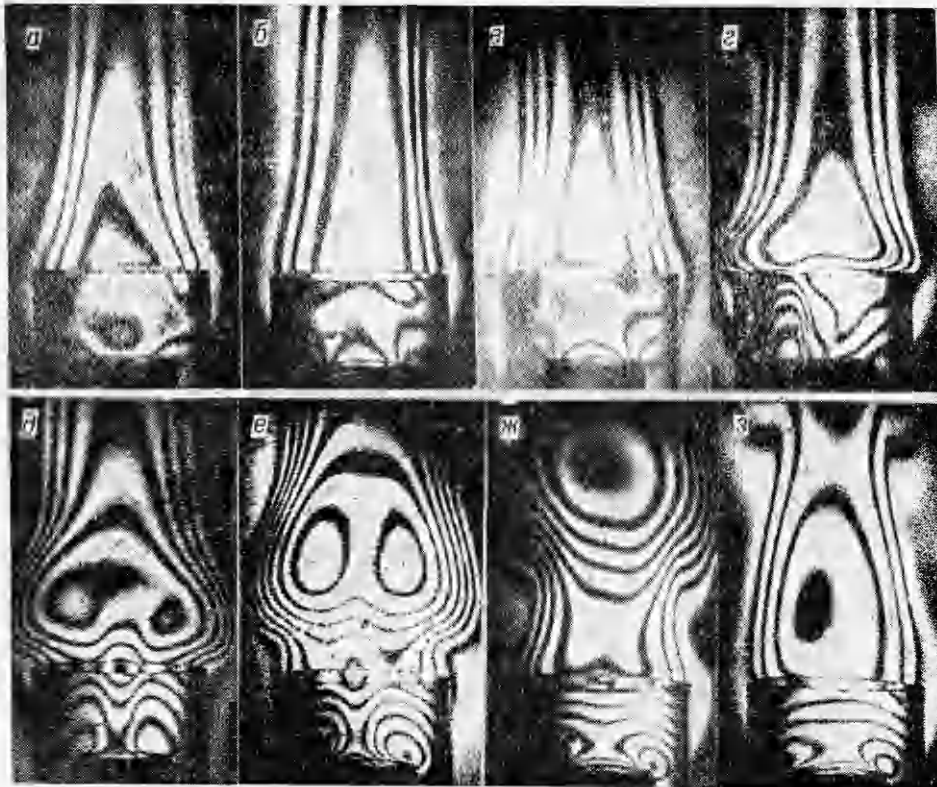


Рис. 2. Мгновенные интерферограммы пламени коаксиальной горелки.  
 Подпериод 1: а)  $t=0,15 T$ , б)  $t=0,40 T$ , в)  $t=0,52 T$ ; подпериод 2: г)  $t=0,70 T$ , д)  $t=0,72 T$ ; подпериод 3: е)  $t=0,78 T$ , ж)  $t=0,88 T$ , з)  $t=0,96 T$ .

на рис. 2, б, в в нижней части области  $B$  — система интерференционных полос свежей горючей смеси. Эта система почти полностью формируется за  $t_{21}=0,059\text{с}=0,40T$  и в дальнейшем в течение времени  $t_{31}=0,04\text{с}=0,26T$ , которое можно назвать временем задержки зажигания, остается неизменной.

2. Продолжительность подпериода  $t_{02}=0,012\text{с}=0,08T$ . Внешнее пламя (вертикальные интерференционные полосы над областью  $B$ ) проскакивает в область  $B$ . Сначала пламя проскакивает в одной части области  $B$  (рис. 2, г, левая часть), затем распространяется в остальные части. Распространение пламени происходит по слою стехиометрии. Примерное распределение соотношения воздух — газ до начала проскока пламени приведено на рис. 1. В этот подпериод сгорает только часть горючей смеси. Быстрое распространение пламени приводит к подсаживанию пламени и образованию «гриба» интерференционных полос (рис. 2, г, левая часть и рис. 2, д).

3. Продолжительность подпериода  $t_{03}=0,040\text{с}=0,26T$ . Вследствие быстрого сгорания в слое стехиометрии в области  $B$  продукты горения и несгоревшая смесь расширяются во все стороны и догорают: часть области  $B$  с  $\alpha > 1$  (рис. 1, б) на срезе внутренней трубки (кольцеобразные системы полос на краях внутренней трубки на рис. 2, е, ж, з), часть области  $B$  с  $\alpha < 1$  во внешнем пламени. Образовавшийся «гриб» интерференционных полос поднимается вверх со скоростью около 1 м/с.

Интерференционные полосы области  $B$ , соответствующие продуктам сгорания, поднимаются вверх, и над внутренней горелкой появляются интерференционные полосы, соответствующие свежей горючей смеси. Они свидетельствуют о начале следующего периода смесеобразования.

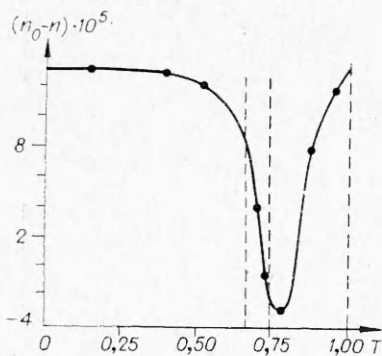


Рис. 3. График функции  $(n_0 - n) = f(T)$ .  
 --- подпериоды колебания.

концентраций горючей смеси;  $t_{03}$  — от поля концентраций горючей смеси, от рода горючего газа, гидродинамических параметров. Варьируя эти параметры, можно менять длительность подпериодов и выбрать наиболее выгодный режим горения исследуемой системы.

Для подтверждения приведенного анализа по интерферограммам рис. 2, а—ж проведен расчет распределения показателя преломления, находящегося в горизонтальном сечении пламени на уровне среза внешней трубки. Расчет проводился по методу [10] на ЭВМ-КВМ-1. На рис. 3 приведен график изменения значения  $n_0 - n$  на оси системы в течение одного периода колебания. Здесь  $n$  — показатель преломления в пламени,  $n_0$  — показатель преломления в исследуемой области в момент первой экспозиции. Изменение  $n_0 - n$  во времени отражает характер процессов, происходящих в области между срезами внешней и внутренней трубок. Поскольку пропорциональное влияние температуры на изменение  $n_0 - n$  в газовых пламенах [11] преобладает, распределение  $n_0 - n$  качественно совпадает с распределением температуры пламени. Начальный участок графика соответствует выходу продуктов горения, предшествующего данному периоду колебания, резкий спад в районе  $t = 0,7 - 0,8 T$  — вытеснению холодной горючей смеси с  $\alpha < 1$  из области В, дальнейший подъем значения  $n_0 - n$  — продуктам догорания в области В горючей смеси с  $\alpha > 1$ .

Поступила в редакцию 8/X 1976,  
 после доработки — 19/VII 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Теория топочных процессов. Под ред. Г. Ф. Кнорре и И. И. Палева. М.—Л., «Энергия», 1966.
2. F. H. Reunst. Pulsating Combustion (Collected works). L., Pergamon Press, 1961.
3. О. Г. Рогинский. ИФЖ, 1965, 9, 2, 236.
4. В. С. Северянин, В. Я. Лысков. Авт. свид. № 222580; Бюллетень изобретений, 1968, 23.
5. С. А. Абрюков, А. Е. Давыдов и др. ИФЖ, 1975, 29, 2, 318.
6. R. E. Brooks, L. O. Heflinger, R. E. Wuerker. Appl. Phys. Lett., 1965, 7, 248.
7. Л. С. Ушаков, Ю. И. Филенко. Оптическая голография и ее применение. Л., ЛДНТП, 1974.
8. Л. С. Ушаков, Ю. И. Филенко. Матер. VI Всесоюзной школы по голографии. Л., ЛИЯФ, 1974.
9. И. Ф. Чугалин, В. Н. Подымов. Вибрационное горение в некоторых модельных устройствах. Казань, изд. КГУ, 1970.
10. H. Schardin. Ver. Deut. Ing. Forschungsheft, 1934, 367, 5, 1—32.
11. С. А. Абрюков. Учен. записки КГУ. Т. 115. Казань, изд. КГУ, 1955.