

О ЛОКАЛЬНЫХ ФЛУКТУАЦИЯХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ГОРЕНИИ КОНДЕНСИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

В. Ф. Проскудин

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, proskudin@dep19.vniief.ru

На примере системы $3Zr + 2WO_3$ показано, что с помощью двух параллельных проволочек, помещенных в горящую систему, можно осуществить регистрацию флуктуаций физико-химических параметров в волне горения конденсированной системы, находящейся как в насыпном, так и в прессованном виде. Установлено, что изменение исходной плотности системы и скорости ее горения приводит к соответствующему изменению частоты флуктуаций, причем в первом приближении связь между этими тремя параметрами можно выразить достаточно простым аналитическим соотношением.

Ключевые слова: горение, конденсированные системы, флуктуации, проволочный зонд.

Флуктуации физико-химических параметров в волне горения прессованной системы $3Zr + 2WO_3$ изучались в работе [1] с применением способа [2], заключающегося в размещении внутри прессовки из изучаемой пиротехнической смеси двух параллельных проволочек, ориентированных вдоль предполагаемого направления движения фронта горения. При горении системы между двумя проволочками возникает пульсирующая разность потенциалов, отражающая флуктуации температуры, химического состава и других параметров в волне горения. Такой способ позволяет оценить частоту ω флуктуаций и при известной линейной скорости горения v найти характерный линейный размер Δ неустойчивостей или неоднородностей в горящей системе по соотношению

$$\Delta = v/\omega. \quad (1)$$

Однако обычно довольно сложно спрессовать образец из пиротехнической смеси, содержащий внутри себя две параллельные проволочки. Гораздо удобнее для регистрации флуктуаций физико-химических параметров в волне горения использовать пиротехнические смеси в насыпном виде.

Лабораторная установка для изучения физико-химических параметров по методу [2] в горящих пиротехнических смесях, находящихся в насыпном виде, показана на рис. 1. Установка включает в себя закрепленные на жестком основании кювету из стального листа толщиной 2 мм с внутренними размерами $47 \times 14 \times 12$ мм и три колодки (3 и 5), изготовленные из электроизоляционного материала, для

закрепления на них стальных штанг (4, 6–8 и 10) диаметром 1 мм каждая. Все штанги имели защитную оболочку в виде пластмассового кембрика (трубочки), свободно надеваемого на штангу. Перед засыпкой пиротехнической смеси в кювету в ней с помощью стальных штанг на расстоянии 4 мм друг от друга устанавливали две одинаковые параллельно расположенные проволочки из вольфрамрениевого сплава марки ВР-5 и мостик накаливания из нихрома (Х20Н80). Диаметр проволочек 100 мкм, длина 30 мм, диаметр мостика накаливания 100 мкм, длина 5 мм. Проволочки и мостик накаливания механически прикрепляли к кончикам штанг. Расстояние от проволочек и мостика накаливания до дна кюветы составляло ≈ 3 мм.

На кончиках стальных штанг 8 и 10, опущенных в кювету также на глубину ≈ 3 мм от ее дна и находящихся на расстоянии 23 мм друг от друга, закрепляли по одной петле размером ≈ 2 мм из нихромовой проволоки диаметром 100 мкм для уменьшения тепловой инерционности при регистрации момента подхода фронта горения к кончику штанги. Момент подхода регистрировали по появлению термоЭДС, возникающей в зоне контакта фронта горения (раскаленных продуктов горения) с нихромовой петлей на кончике штанги.

В качестве пиротехнического состава использовали стехиометрическую смесь порошков Zr и WO_3 [1, 3, 4]. В кювету засыпали 8 г смеси, равномерно распределяя ее по длине кюветы. При этом образовывался слой смеси толщиной $\approx 6 \div 7$ мм с относительной плотностью 0,19. Затем лопаточкой слегка отгребали часть

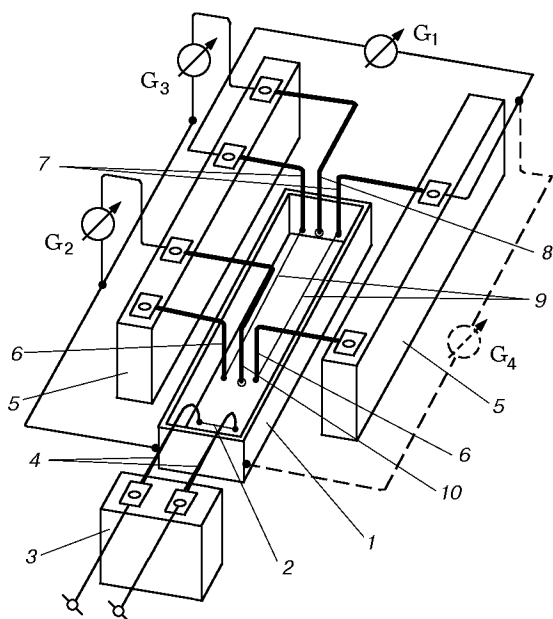


Рис. 1. Лабораторная установка для исследования горения пиротехнических смесей в насыпном виде:

1 — стальная кювета для размещения порошка исследуемого пиротехнического состава; 2 — нихромовый мостик накаливания; 3, 5 — колодки с клеммами; 4, 6, 7, 8, 10 — стальные штанги; 9 — проволоочки из сплава ВР-5; G_1, G_2, G_3, G_4 — гальванометры светолучевого осциллографа Н-117

смеси от мостика накаливания и насыпали на него 0,25 г воспламенительного пиротехнического состава, изготовленного на основе порошка циркония и свинцового сурика [5, 6]. После этого всю кювету засыпали кварцевым песком так, что образовывалась горка, высота которой на 1 ÷ 2 см превышала внешние размеры кюветы.

При пропускании электрического тока по мостику накаливания вначале происходило зажигание воспламенительного пиротехнического состава, а затем пиротехнического состава $3Zr + 2WO_3$. В составе $3Zr + 2WO_3$ возникала волна горения, проходящая вдоль вольфрамрениевых проволоочек. С помощью гальванометра G_1 регистрировали изменение разности потенциалов между этими проволоочками во времени. Гальванометры G_2 и G_3 регистрировали моменты прохождения волны горения через зоны расположения соответствующих стальных штанг.

В ряде опытов вместо гальванометров G_2 и G_3 использовали электрическую схему с гальванометром G_4 (на рис. 1 она показана

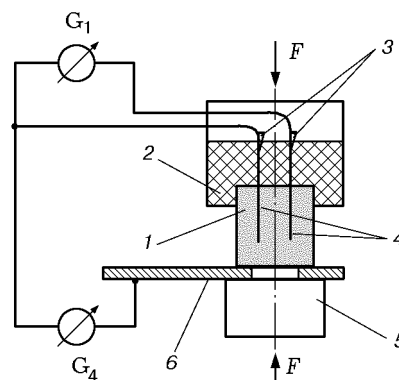


Рис. 2. Лабораторная установка для исследования горения пиротехнических смесей в прессованном виде:

1 — образец из исследуемого пиротехнического состава; 2 — корпус из материала АГ-4; 3 — деревянные палочки (клинья) для фрикционного закрепления проволочек из сплава ВР-5; 4 — проволоочки из сплава ВР-5; 5 — электровоспламенитель; 6 — стальной электрод; F — усилие прижатия деталей лабораторной сборки в процессе испытаний; G_1, G_4 — гальванометры светолучевого осциллографа Н-117

штриховой линией). Это позволяло оценить абсолютную величину ЭДС, возникающей между одной из вольфрамрениевых проволочек и корпусом кюветы, и сравнить это значение с амплитудой пульсаций разности ЭДС, возникающей между вольфрамрениевыми проволочками. При этом пульсации разности ЭДС регистрировали гальванометром G_1 .

Изучение флуктуаций физико-химических параметров в прессованных образцах из пиротехнической смеси $3Zr + 2WO_3$ проводили с использованием лабораторной установки, механическая часть которой подробно описана в работе [7]. Цилиндрические образцы из пиротехнической смеси $3Zr + 2WO_3$ диаметром 7 мм и высотой 7 мм с бумажным бандажом на цилиндрической поверхности сжигали при постоянном осевом сжатии усилием $F \approx 4$ Н, при этом велась непрерывная запись электрических сигналов с помощью гальванометров G_1 и G_4 (рис. 2). Относительная плотность прессования пиротехнической смеси составляла 0,6. Внутри прессованных образцов располагались две проволоочки из сплава ВР-5 диаметром 100 мкм на расстоянии 4 мм друг от друга.

Прессование образцов проводили следующим образом. В отверстия корпуса продевали две проволоочки из сплава ВР-5 и закрепляли их с помощью заостренных деревянных кли-

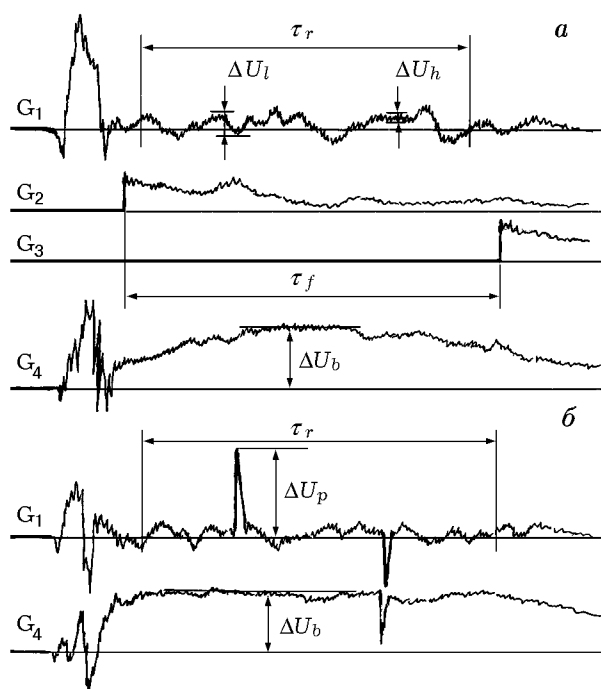


Рис. 3. Характерный вид осциллограмм электрических сигналов, получаемых на лабораторных установках для исследования горения пиротехнических смесей в насыпном (а) и прессованном (б) виде:

G_1, G_2, G_3, G_4 — электрические сигналы (см. рис. 1 и 2); τ_r — время подсчета пульсаций электрического сигнала G_1 ; τ_f — время прохождения волны горения между двумя стальными штангами, расположенными внутри пиротехнической смеси; ΔU_l и ΔU_h — амплитуды соответственно низкочастотных и высокочастотных пульсаций электрического сигнала G_1 ; ΔU_p — пиковые пульсации электрического сигнала G_1 ; ΔU_b — ЭДС, возникающая между провололкой из сплава ВР-5 и стальным электродом (корпусом кюветы) при горении пиротехнической смеси

ньев так, чтобы проволоочки, будучи закрепленными, могли перемещаться вдоль отверстий, если их вытягивать за свободные концы с небольшим усилием. Длина той части проволоочек, которая в дальнейшем оказывалась запрессованной в образец, составляла $\approx 2/3$ высоты еще не спрессованного образца, т. е. высоты засыпки исходной пиротехнической смеси в матрицу стальной пресс-формы. Корпус с установленными в нем проволочками помещали в пресс-форму, в матрицу помещали бумажную трубку из беззольного фильтра (подробнее см. [7]) и засыпали через нее порошок пиротехнической смеси, пуансоном прессуя образец. В процессе прессования боковые поверхности проволоочек обжимались пиротехнической сме-

сью и по мере уплотнения смеси могли перемещаться вместе со смесью в основном только в осевом направлении, чему способствовало их нежесткое (фрикционное) закрепление в отверстиях корпуса. В результате прессования получали деталь, состоящую из образца, корпуса и двух проволоочек. Деталь помещали в лабораторную установку, как показано на рис. 2. При срабатывании электровоспламенителя образующийся форс пламени через отверстия в стальном электроде зажигал образец в плоскости его нижнего торца, возникшая волна горения перемещалась вверх по образцу. После достижения волной горения запрессованных в образец вольфрамениевых проволоочек начиналась регистрация электрических сигналов гальванометрами G_1 и G_4 (рис. 3, б).

Качественно осциллограммы пульсаций электрического сигнала, регистрируемого гальванометром G_1 , для прессованной смеси $3Zr + 2WO_3$ и этой же смеси в насыпном виде достаточно близки. Но вместе с тем обращают на себя внимание пиковые отклонения ΔU_p электрического сигнала, регистрируемого гальванометром G_1 , в случае горения прессованных образцов и отсутствие таких отклонений при горении смеси в насыпном виде. Причем величина ΔU_p довольно значительна и сравнима с величиной ЭДС ΔU_b . Наиболее вероятное объяснение этого факта состоит в предположении, что в прессованном образце перед фронтом горения могут возникать локальные поперечные трещины, аналогичные наблюдавшимся, например, в работах [8–10].

Появление локальной трещины, пересекающей только одну из вольфрамениевых проволоочек (или обе проволоочки, но на разном удалении от фронта горения), приводит к резкому изменению температуры при прохождении волны горения через трещину [11], в то время как на другой вольфрамениевой проволочке, где в этот момент в зоне фронта горения нет локальной трещины, следует ожидать уровень температуры, близкий к обычно реализующемуся среднему значению. Возникшее таким образом пиковое изменение температуры на одной из вольфрамениевых проволоочек и может обуславливать появление пикового сигнала с соответствующей амплитудой ΔU_p , регистрируемого гальванометром G_1 .

При горении пиротехнической смеси в непрессованном виде образование трещин в ней практически исключено, так как в насыпном

Относительная плотность системы $3Zr + 2WO_3$	Частота высокочастотных флуктуаций, Гц	Скорость горения, мм/с
0,19 (насыпная)	450 ± 10	64 ± 4
0,60 (прессованная)	250 ± 50	24 ± 3

виде нет сил сцепления между частичками смеси и отсутствуют внутренние напряжения. Именно из-за этого, по-видимому, отсутствуют пиковые изменения сигнала, регистрируемого гальванометром G_1 , для смесей, сгорающих в насыпном виде.

Как отмечалось в работе [1], при горении пиротехнической смеси $3Zr + 2WO_3$ наблюдаются флуктуации физико-химических параметров двух видов — низкочастотные (частота флуктуаций составляет десятки герц) и высокочастотные (частота флуктуаций — сотни герц). Низкочастотные флуктуации, отвечающие характерным размерам неустойчивостей порядка 1 мм, оцениваемых по соотношению (1), обусловлены, по-видимому, в большей степени особенностями приготовления образца для испытаний в конкретной лабораторной установке. То есть этот тип низкочастотных флуктуаций связан, в том числе, и с разными условиями теплоотвода в локальных зонах проволочек-зондов, вследствие чего значения температуры, а следовательно, и термоЭДС, возникающей в зоне контакта проволочек с волной горения при прохождении последней вдоль проволочек, несколько различаются. Наряду с другими причинами это приводит к плавно меняющейся во времени разности потенциалов переменного знака между проволочками. Амплитуда ΔU_l этих колебаний в условиях наших экспериментов составляла $5 \div 10$ мВ. Амплитуда ΔU_h высокочастотных колебаний при этом не превышала $1 \div 2$ мВ.

Высокочастотные флуктуации, имеющие характерный линейный размер неустойчивостей $\Delta \approx 0,1$ мм, т. е. сравнимый с шириной фронта горения, скорее всего, являются свойством самой горячей конденсированной системы и отражают флуктуации физико-химических параметров преимущественно в волне горения. Приняв это предположение, можно ожидать, что при изменении макроскопических условий горения, например, при изменении теплофизических характеристик отдельных узлов лабораторной установки, находящихся в контакте с горящим образцом, не

будет заметных изменений частотных характеристик высокочастотных флуктуаций. Это дает возможность сравнивать полученные на разных лабораторных установках результаты измерения частоты высокочастотных флуктуаций, например, данные, полученные для системы $3Zr + 2WO_3$ в насыпном и в прессованном виде (см. таблицу).

Различные значения частоты высокочастотных флуктуаций, реализующиеся при горении смеси $3Zr + 2WO_3$ в насыпном и прессованном виде, в первом приближении удается легко объяснить соответствующим изменением плотности конденсированной системы и скорости ее горения. Действительно, пользуясь соотношением (1), запишем выражение

$$\frac{\omega_0}{\omega} = \frac{v_0}{v} \frac{\Delta}{\Delta_0}, \quad (2)$$

где индексом 0 обозначены параметры, относящиеся к системе в насыпном виде, а параметры без индекса соответствуют системе в прессованном виде. Учитывая, что линейные размеры уплотняемой системы обратно пропорциональны ее плотности в степени $1/3$, запишем выражение (2) в виде

$$\frac{\omega_0}{\omega} = \frac{v_0}{v} \frac{\sqrt[3]{\rho_0}}{\sqrt[3]{\rho}}, \quad (3)$$

где ρ и ρ_0 — относительные плотности системы в прессованном и насыпном виде соответственно.

Используя результаты прямых измерений частоты высокочастотных флуктуаций для системы $3Zr + 2WO_3$, приведенные в таблице, находим значение $\omega_0/\omega = 1,8$, а пользуясь выражением (3), по данным средних значений относительной плотности и скорости горения из этой же таблицы — значение $\omega_0/\omega = 1,82$.

Как видим, прямые и косвенные оценки величины ω_0/ω достаточно близки, что говорит об удовлетворительном отражении соотношением (3) аналитической связи между тремя рассматриваемыми здесь параметрами: частотой флуктуаций в волне горения, относительной плотностью горячей системы и скоростью ее горения.

Конечно, реально частота флуктуаций физико-химических параметров в волне горения зависит от гораздо большего числа переменных, и связь между этими переменными для оценки значения частоты флуктуаций ω в волне горения должна быть, скорее всего, намного сложнее. Однако для предварительных оценок изменения частоты флуктуаций при изменении условий горения соотношение (3), по-видимому, может оказаться весьма полезным.

Автор выражает благодарность сотрудниками ВНИИ экспериментальной физики Е. Н. Беляеву, Л. А. Журавлевой, А. Г. Лещинской, В. Н. Тараканову за помощь в работе и П. Г. Бережку за ее поддержку.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Проскудин В. Ф.** Регистрация локальных флуктуаций физико-химических параметров в волне горения конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 6. С. 71–75.
2. **Устройство** для испытаний пиротехнического состава: Пат. РФ № 2149401 / Проскудин В. Ф. Бюл. изобрет. 2000. № 14.
3. **А. с. 377315.** Термитная смесь / Сорокин В. П., Воронов П. А., Леваков Е. В. Бюл. изобрет. и товарных знаков. 1973. № 18.
4. **Леваков Е. В., Пелесков С. А., Сорокин В. П.** Термоэлектрический метод регистрации автоколебательного режима горения // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 18–22.
5. **Лашков В. Н., Лобанов В. Н.** Взрывчатые составы первичного заряда детонаторов и воспламенителей // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. докл. науч. конф. Волжского регионального центра Российской академии ракетно-артиллерийских наук. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000. С. 391–394.
6. **Проскудин В. Ф.** Измерение ЭДС горения конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 5. С. 90–96.
7. **Проскудин В. Ф.** Оценка величины ЭДС в волне горения конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 2. С. 56–61.
8. **Butakov A. A., Vaganov D. A., Leont'ev S. N.** Study of crack appearance in porous media combustion // Combust. Sci. Technol. 1995. V. 106, № 1–3. P. 137–152.
9. **Браверман Б. Ш., Зиатдинов М. Х., Максимов Ю. М.** О нетепловой природе нестационарности при горении хрома в азоте // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 1. С. 43–46.
10. **Проскудин В. Ф.** О роли механических деформаций горящих образцов в эстафетном горении безгазовых систем // Докл. АН. 2002. Т. 387, № 2. С. 188–190.
11. **Мержанов А. Г., Кришеник П. М., Шкадинский К. Г.** Модель поперечного распространения твердого пламени в чередующихся слоях горючего и инертного вещества // Докл. АН. 2001. Т. 380, № 3. С. 323–327.

Поступила в редакцию 28/VIII 2003 г.