

гентов. Первое отличие объясняется тем, что кремний не образует, как железо, устойчивых низших оксидов. Второе отличие объясняется чрезвычайно высокой термодинамической устойчивостью и прочностью метасиликата натрия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лякишев Н. П. Аллюминотермия.— М.: Металлургия, 1978.
2. Самсонов Г. В., Перминов В. П. Магниотермия.— М.: Металлургия, 1971.
3. Ситтинг М. Натрий, его производство, свойства и применение.— М.: Госатомиздат, 1961.
4. Goetz G. Pat. 4062708, USA, 1977.
5. Valentin D. Pat. 3996079, USA, 1976.
6. Шидловский А. А. Основы пиротехники.— М.: Машиностроение, 1973.
7. Мержанов А. Г. // Физическая химия, современные проблемы.— М.: Химия, 1983.
8. Боровинская И. П., Новиков Н. П. // Процессы горения в химической технологии и металлургии.— Черноголовка, 1975.
9. Певзнер Р. Л. Термитовые огнеупоры.— М.: Промстройиздат, 1951.
10. Lundstrom N. Pat. 03865660, USA, 1975.
11. Kirchoff G. Pat. 04203787, USA, 1980.
12. Косолапов В. Т., Левашов А. Ф., Марков Ю. М. и др. // Тугоплавкие нитриды.— Киев, 1983.
13. Косолапов В. Т., Шмельков В. В., Левашов А. Ф. и др. // Вторая Всесоюз. конф. по технологическому горению.— Черноголовка, 1978.

*г. Алма-Ата*

*Поступила в редакцию 20/II 1989,  
после доработки — 11/XII 1989*

УДК 536.46 + 621.386

**Е. Н. БЕЛЯЕВ, П. Г. БЕРЕЖКО, В. А. ГОЛУБЕВ, В. В. ОСТРОВСКИЙ,  
В. Ф. ПРОСКУДИН**

### **УСТАНОВКА ИМПУЛЬСНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ ГОРЯЩИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ**

Импульсная рентгенография, позволяя получать мгновенные снимки исследуемых объектов, дает широкие возможности для изучения самых различных меняющихся во времени процессов. Так, например, в [1] описан импульсный рентгеновский аппарат для изучения движущихся биологических объектов. Известны и другие области применения импульсной рентгенографии с использованием оригинальных импульсных рентгеновских аппаратов [2—4], в частности импульсное рентгеновское просвечивание горящего пиротехнического состава (ПТС) [4].

Весьма перспективно использование импульсной рентгенографии для исследования процессов горения ПТС. Химические превращения в зоне фронта горения ПТС обычно резко изменяют плотность образца в этой зоне, что в большинстве случаев легко просматривается импульсным рентгеновским просвечиванием. По сравнению с традиционными методами изучения распространения волны горения в образце из ПТС такой способ не требует вводить в образец какой-либо зонд, датчик или световод, искажающий в той или иной степени естественный ход процесса горения. Причем для любого заданного момента можно получить информацию о положении фронта горения, его конфигурации, форме конденсированных (обычно расплавленных) частиц продуктов реакции, вылетающих из зоны фронта горения (если горение сопровождается образованием именно таких продуктов), а также о состоянии еще не сгоревшей части образца (возможное появление трещин, каверн и т. п.).

© 1990 Беляев Е. Н., Бережко П. Г., Голубев В. А., Островский В. В., Проскудин В. Ф.

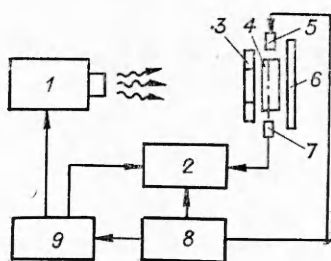


Рис. 1. Схема установки.

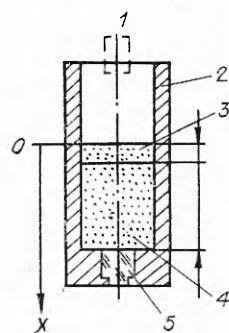


Рис. 2. Схема лабораторной сборки.

В настоящей работе использован малогабаритный электронно-рентгеновский наносекундный аппарат МИН. На рис. 1 показана схема установки, позволяющей с помощью такого импульсного рентгеновского аппарата получать мгновенные снимки горящего образца из ПТС. С блока задействия 8 одновременно подаются три сигнала: на электровоспламенитель 5, шлейфовый осциллограф 2 (для записи момента задействия электровоспламенителя) и генератор 9, который спустя заданное время  $t_p$  выдает сигнал на срабатывание рентгеновского аппарата 1. Одновременно с генератора 9 подается сигнал и на шлейфовый осциллограф 2 для записи момента срабатывания рентгеновского аппарата. Фотодиод 7 позволяет записать на осциллографе момент выхода волны горения на торец образца 4. Кассета 6 с рентгеновской пленкой снабжена усиливающими экранами; 3 — диафрагма.

Размеры фокусного пятна рентгеновской трубки ИА-6, установленной в аппарате МИН, составляют  $<6$  мм, что при расстоянии от рентгеновской трубки до оси образца 50—100 см, а от оси образца до рентгеновской пленки 2—3 см дает возможность получать достаточно четкие рентгеновские снимки (размытие теневого изображения разноплотностей в горящем образце не более 0,2—0,4 мм в зависимости от выбранных расстояний между рентгеновской трубкой, образцом и рентгеновской пленкой).

На установке можно просвечивать образцы диаметром 15—20 мм из различных ПТС, не содержащих в большом количестве тяжелых элементов (Mo, W, Pb и др.). Причем образец может находиться в металлическом (в стальном) корпусе с толщиной стенки до нескольких миллиметров. Малое время экспозиции — порядка десятков наносекунд (длительность рентгеновского импульса аппарата МИН, измеренная на полувысоте,  $\sim 20 \cdot 10^{-9}$  с) — позволяет изучать быстротекущие процессы. А при изучении горения ПТС, когда скорость движения фронта практически никогда не превышает десятков метров в секунду, временем экспозиции такого порядка вообще можно пренебречь. В целом установка позволяет определять положение фронта горения в горящем образце в заданный момент времени с погрешностью, не превышающей 15—20 %.

Образцы 4 состава  $Fe_2O_3 + Al$  (соотношение компонентов в процентах по массе 75/25 соответственно) в количестве 7 г запрессовывали для сжигания в стальной цилиндр 2 усилием 2 т (плотность запрессовки  $\sim 2,2$  г/см<sup>3</sup>) (рис. 2). Цилиндр имел внутренний диаметр 15 и толщину стенки 3 мм. Для обеспечения надежного зажигания образца на него дополнительно: небольшим усилием (от руки) напрессовывали 1 г того же состава. Таким образом, в цилиндре над образцом высотой 17,5 мм находилась таблетка 3 толщиной 3,5 мм из того же состава, но с меньшей плотностью. Чтобы определить суммарное время горения системы таблетка + образец  $t_{\Sigma}$ , в цилиндре предусмотрена вставка 5 из оргстекла, позволяющая с помощью фотодиода регистрировать момент выхода вол-

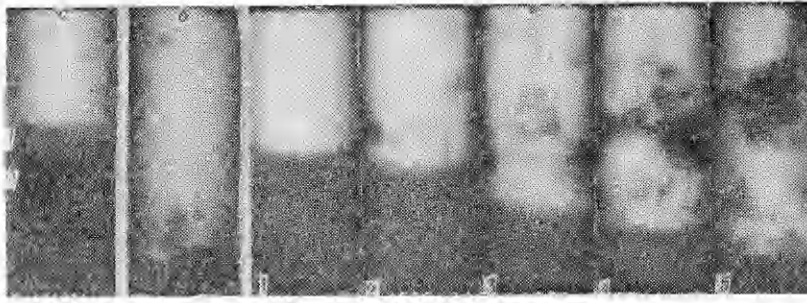


Рис. 3. Рентгеновские снимки лабораторныхборок.

ны горения на торец образца (1 — положение электровоспламенителя,  $OX$  — ось координат для «привязки» положения фронта горения образца к лабораторной сборке).

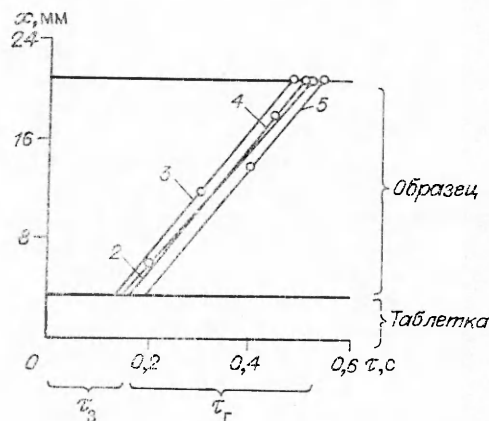
На рис. 3 приведены рентгеновские снимки, сделанные до (а) и после опыта (б) и в разные моменты времени горения образцов (в). Расстояние от рентгеновской трубки до лабораторной сборки  $\sim 50$  см; экспозиционная доза рентгеновского излучения за один импульс на таком расстоянии 4 мкКл/кг ( $\sim 15$  МР). На рис. 3, а можно довольно отчетливо различить положение таблетки 1 и образца 2 из состава  $Fe_2O_3 + Al$ , а на рис. 3, в видны положение и конфигурация фронта горения и разлетающихся частиц продуктов реакции. Эти снимки дают возможность определить координату фронта горения  $x_{фр}$  для соответствующего момента  $\tau_r$ . Данные, полученные в опытах, приведены в таблице. Для образца 1 рентгеновский снимок сделан до начала его горения, о чем говорит значение координаты  $x_{фр}$ , равное для этого случая толщине таблетки.

Образцы 2—5 просвечивались во время их горения, для них с использованием значений  $\tau_r$ ,  $x_{фр}$  и  $\tau_z$  построены зависимости  $x_{фр}(\tau)$  (рис. 4). Графики строили по двум точкам (для  $\tau_r$  и для  $\tau_z$ ) в предположении, что зависимость  $x_{фр}(\tau)$  имеет линейный характер. То, что все линии практически параллельны, говорит о постоянстве скорости горения образцов (т. е. о правильности сделанного предположения). По зависимости  $x_{фр}(\tau)$  легко определить времена зажигания  $\tau_z$  (оно включает в себя времена задержки и время горения таблетки) и горения  $\tau_r$  и скорость горения  $v$  образца. Найденные по рис. 4 числовые значения приведены в таблице.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что установка для импульсного рентгеновского просвечивания горящих образцов из ПТС (включающая в основном выпускаемые промышленностью приборы) может служить полезным инструментом для исследования процессов горения конденсированных ПТС.

| Номер образца | $\tau_r$ , с | $x_{фр}$ , мм | $\tau_z$ , с | $\tau_z$ , с | $\tau_r$ , с | $v$ , мм/с |
|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| 1             | 0,1          | 3,5           | 0,50         | —            | —            | —          |
| 2             | 0,2          | 6             | 0,52         | 0,15         | 0,37         | 47         |
| 3             | 0,3          | 12            | 0,48         | 0,13         | 0,35         | 50         |
| 4             | 0,4          | 14            | 0,54         | 0,19         | 0,35         | 50         |
| 5             | 0,45         | 18            | 0,51         | 0,15         | 0,36         | 49         |

Рис. 4. Зависимости координаты фронта горения от времени.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Sato E., Isobe H., Hoshino F. Rev. Sci. Instr., 1986, 57, 7.
2. Germer R. J. Physics, E, Sci. Instr., 1979, 12, 5.
3. Kondo K., Sawaoka A., Saito S. // Proc. 13th Intern. Congr. on High Speed Photography and Photonics.— Tokyo, 1978.
4. Георгиевский С. С., Градусов С. П., Коваль А. И. и др. // Проблемы технологического горения: Кинетика, термодинамика, механизм и теория горения.— Черно-голова: АН СССР, 1981.— Т. 1.

г. Москва

Поступила в редакцию 26/IV 1989,  
после доработки — 19/IX 1989

УДК 536.3 : 532.517.4

Ю. В. БЕЛЯЕВ, А. И. БРИЛЬ, О. Б. ЖДАНОВИЧ, Ю. В. ХОДЫКО

### О ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТЕЙ В ТУРБУЛЕНТНЫХ НАГРЕТЫХ СТРУЯХ

Для успешной реализации численного моделирования турбулентных реагирующих течений необходимо знать закономерности распределений в потоке пассивной примеси, т. е. ее среднего значения и вероятностных характеристик ее флуктуаций. Например, важнейшие особенности влияния турбулентных пульсаций на диффузионное горение [1] или на воспламенение струи [2] можно приближенно учесть с использованием функций плотности вероятностей (ФПВ) для концентрации пассивной примеси  $z$ . Практическая значимость распределений  $z$  в турбулентных потоках стимулировала разработку многочисленных моделей, соответствующих ФПВ [3—6].

Основной способ проверки адекватности подобных моделей — сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными. Прямые измерения ФПВ в турбулентных потоках связаны прежде всего с применением методов лазерной диагностики. В качестве примера можно указать работы [7, 8], где демонстрируется возможность измерений ФПВ температуры и концентраций в пламенах. Несмотря на значительные успехи в этой области, методы лазерной диагностики остаются еще достаточно сложными и дорогостоящими, что часто сдерживает их применение на практике. В связи с этим актуален также поиск альтернативных способов проверки применимости модельных ФПВ концентрации пассивной примеси. В [9, 10] показано, что один из таких способов может основываться на сопоставлении рассчитанного и измеренного теплового излучения нереагирующей турбулентной струи. При этом используется приближенное соотношение, связывающее яркость струи и одноточечные ФПВ температуры и концентраций [11].

В [10] описанный выше подход реализован для лабораторной струи продуктов сгорания углеводородных топлив. Измерены и рассчитаны осевые распределения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ)  $I_\nu$  в направлении, перпендикулярном оси струи. Анализ проводился в диапазоне  $\nu = 2200 \div 2300 \text{ см}^{-1}$  (основной вклад в излучение здесь вносят  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ ). Выполненный анализ позволил сделать определенные выводы о границах применимости различных моделей ФПВ, которые закладывались в программы расчетов. Однако следует иметь в виду, что  $I_\nu$  струи содержит информацию о температуре и концентрации в виде сверток по лучу с достаточно сложными весовыми функциями. Кроме того, осевые распределения  $I_\nu$  в значительной степени формируются наиболее горячими приосевыми участками, поэтому на основе ре-