

РЕГИСТРАЦИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО РЕЖИМА ГОРЕНИЯ ДАТЧИКОМ ОСЕВОГО УСИЛИЯ

В. Ф. Проскудин, В. А. Голубев, П. Г. Бережко, И. Е. Бойцов,
Е. Н. Беляев, Л. А. Журавлева, И. К. Кремзуков,
А. Я. Малышев, В. В. Островский

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Показана возможность регистрации датчиком осевого усилия автоколебательного режима горения образцов, дающих твердые продукты реакции и некоторое количество газовой фазы. В экспериментах использовали прессованные образцы из смеси $Ti + C + 20\% TiC$, содержащие дистиллированную воду в порах прессовки. Получены параметры пульсаций давления газовой фазы в зоне фронта реакции таких образцов, сгорающих в автоколебательном режиме.

Автоколебательный режим горения конденсированных систем изучен достаточно подробно [1–4]. Известны экспериментальные методы регистрации пульсаций скорости горения образцов [2–4] и их температуры горения [5] при сгорании в этом режиме. Вместе с тем в ряде случаев возникает необходимость экспериментальной регистрации пульсаций давления газовой фазы в зоне фронта горения. Такой вопрос возник, в частности, в связи с работами по выяснению возможности разложения жидких токсичных и отравляющих веществ путем их быстрого нагрева в порах горячей конденсированной системы. Суть данного способа разложения жидких веществ изложена, например, в докладе: П. Г. Бережко, А. С. Буланников, А. В. Голубев, В. А. Голубев, Л. А. Журавлева, В. Ф. Проскудин, А. В. Стеньгач, В. В. Ярошенко «Воздействие термического нагрева от сгорания пиротехнических составов на отравляющие вещества и их имитаторы», представленном на Российско-американском симпозиуме «Вредные материалы» (Арзамас-16, 26 января — 2 февраля 1994 г.)*.

Жидкое вещество, находясь в порах прессовки, отбирает в зоне фронта горения значительную часть тепла на нагрев, испарение и разложение, что должно приводить к существенному снижению температуры горения. Это, в свою очередь, может перевести горение системы из стационарного режима в автоколебательный. При этом в зоне фронта горения следует ожидать высокое давление газо-

вой фазы, что может оказать заметное влияние на дальнейший процесс горения системы. Поэтому с целью более глубокого понимания механизма физико-химических процессов, протекающих в зоне фронта горения таких систем, желательно владеть экспериментальным методом регистрации пульсаций давления газовой фазы.

По нашему мнению, для регистрации величины и параметров пульсаций давления газовой фазы в зоне фронта горения наиболее подходит метод, основанный на непрерывном измерении осевого усилия, создаваемого горящим образцом [6]. При этом в случае реализации автоколебательного режима горения, близкого к режиму «идеальных пульсаций»**, изменение давления в зоне фронта горения дает возможность оценить ряд важных параметров горения, таких как время горения прогретого слоя (τ_f), в течение которого наблюдается рост давления; время остановки фронта горения (τ_e), в течение которого давление снижается по закону, близкому к экспоненциальному; максимальное (p_{max}) и минимальное (p_{min}) значения давления при его пульсации (рис. 1) и соответственно амплитуда ($\Delta p = p_{max} - p_{min}$) и частота ($\nu = 1/(\tau_f + \tau_e)$) пульсаций давления.

В реальной ситуации осциллограммы изменения осевого усилия (а следовательно, и графики изменения давления газовой фазы в зоне фронта горения) могут быть заметно иска-

*Материалы этого симпозиума, по имеющимся у нас сведениям, до настоящего времени не опубликованы.

**Имеется в виду абсолютная синхронность изменения параметров автоколебательного режима горения во всех точках поперечного сечения образца, являющегося фронтом горения этого образца.

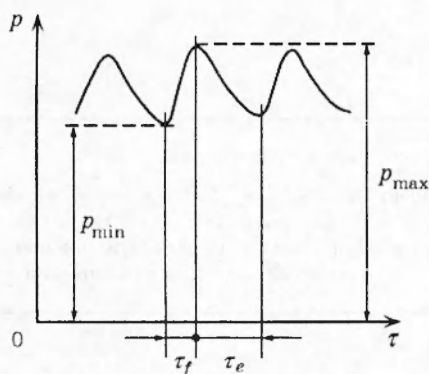


Рис. 1. Схема пульсаций давления в зоне фронта реакции при автоколебательном режиме горения

жены. Дело в том, что методом [6] регистрируется давление, усредненное по всему поперечному сечению образца, находящегося в зоне фронта горения. Поэтому несинхронность остановки фронта горения (равно, как и несинхронность начала загорания прогретого слоя) в разных локальных зонах этого поперечного сечения будет приводить к «размытию» получаемых пульсаций давления. Можно указать и другие источники возможных искажений. Тем не менее предлагаемый метод регистрации в любом случае представляется полезным. При реализации автоколебаний, близких к «идеальным», можно получить значения параметров этих колебаний, а в противном случае — констатировать существенные отклонения реализующегося режима горения от режима «идеальных пульсаций».

В опытах использовали образцы из смеси $Ti + C + 20\% TiC$ (далее формула смеси образцов не приводится), применявшейся ранее [7], с поджигающими таблетками из смеси $Zr + WO_3$ [5]. Диаметр образцов и таблеток, определяемый внутренним диаметром оболочек-стаканов, в которые запрессовывали смеси, составлял 25 мм. Давление прессования смеси всегда было одним и тем же — 10^2 МПа.

Контрольные опыты с использованием лабораторныхборок, позволяющих измерять одновременно и осевое усилие F , и давление газовой фазы p в момент прихода фронта горения в зону глухого торца образца [6], показали, что пористые шлаки, образующиеся за фронтом горения прессовки, обеспечивают требуемые по данным работы [6] условия выполнения соотношения

$$p = F/S, \quad (1)$$

где S — площадь поперечного сечения образца.

При этом погрешность определения давления газовой фазы по соотношению (1) в диапазоне значений $p \approx 3 \div 30$ МПа не превышала 10%. В контрольных опытах образцы в зоне глухого торца содержали включения зерен пироксилинового пороха общей массой $0,1 \div 0,3$ г, обеспечивающего при сгорании достаточное количество газовой фазы, которая необходима для эффективного сравнения значений p и F/S , так как собственное газовыделение смеси при сгорании оказалось недостаточным для заданной цели.

Таким образом, образцы, обеспечивая при сгорании выполнение соотношения (1), являются хорошей моделью для изучения возможности регистрации автоколебательного режима горения с помощью датчика осевого усилия.

Дальнейшие опыты проводили с использованием лабораторной сборки, показанной на рис. 2. Смесь запрессовывали в стальной стакан за несколько приемов, формируя образец требуемой высоты h_s . Поджигающую таблетку толщиной $\approx 0,7$ мм получали последующей запрессовкой смеси $Zr + WO_3$ за один прием. Чтобы получить плоский фронт горения образца, над таблеткой помещали стальную сетку. Сетка распределяла форс пламени электровоспламенителя, находящегося во вкладыше, по всей поверхности таблетки, обеспечивая ее равномерное зажигание. Датчик осевого усилия закрепляли между вкладышем и одной из опорных поверхностей, после чего создавали начальное осевое усилие $F_0 \approx 3$ кН.

Характерный вид осциллограмм изменения осевого усилия при горении образцов высотой $h_s = 22 \div 44$ мм, показанный на рис. 3, а, свидетельствует, что каких-либо резких изменений осевого усилия, а следовательно, и давления газовой фазы в зоне фронта горения не наблюдается.

Чтобы проверить адекватность реакции экспериментальной установки на искусственно создаваемую однократную или периодическую пульсацию давления газовой фазы при горении образца, по всему поперечному сечению средней части образца располагали либо тонкий слой инертного материала (порошка сажи), либо зерна пироксилинового пороха, либо набор последовательно расположенных слоев из смеси, разделенных прокладками из фильтровальной бумаги. Горение таких образцов сопровождалось соответствующими пульсациями осевого усилия: при прохождении фронтом горения прослойки из инертного материала осевое

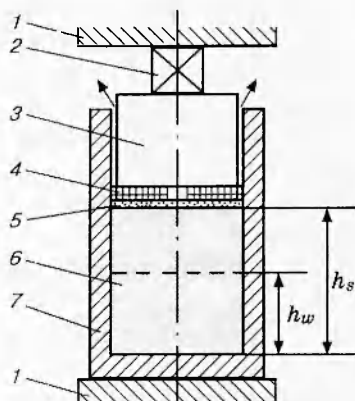


Рис. 2. Схема лабораторной сборки:

1 — опорная поверхность, 2 — датчик осевого усилия, 3 — вкладыш, 4 — стальная сетка, 5 — таблетка, 6 — образец, 7 — стальной стакан; стрелками показано направление выхода газа из образца при его горении

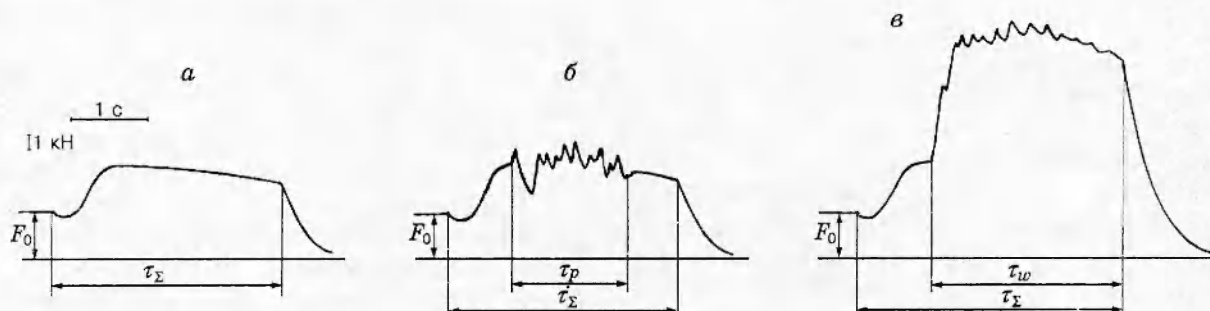


Рис. 3. Осциллограммы изменения осевого усилия во времени:

τ_{Σ} — общее время горения поджигающей таблетки и образца; а — образец ($h_s = 44$ мм) без посторонних включений; б — образец ($h_s = 30$ мм) содержит в средней части набор из десяти бумажных прокладок (марки «синяя лента» по ТУ 6-09-1678-86), расположенных с шагом ≈ 1 мм, τ_p — время горения участка образца, содержащего бумажные прокладки; в — образец ($h_s = 33$ мм) содержит в нижней части ($h_w = 18$ мм) дистиллированную воду, заполняющую поры прессовки, τ_w — время горения участка образца, содержащего воду

усилие снижалось по закону, близкому к экспоненциальному; при прохождении фронтом горения слоя смеси, содержащего включения из пороха, наблюдалось пиковое повышение осевого усилия; в случае горения набора слоев смеси и бумажных прокладок появлялись периодические пульсации осевого усилия, причем их количество равнялось количеству размещенных в образце бумажных прокладок (рис. 3, б). Все это подтверждает адекватность сигналов с датчика осевого усилия тем возмущениям давления газовой фазы, которые искусственно создавали в зоне фронта горения образца.

Чтобы перевести горение системы $Ti + C + 20\% TiC$ в автоколебательный режим путем снижения температуры горения с одновременным повышением газовыделения в зоне фронта реакции, поры образца заполняли дистиллированной водой. Следует отметить, что аналогичное предложение (но для получения друго-

го физического эффекта) содержится в работе [8]. Пористый образец заполняли водой следующим образом. В стакан (см. рис. 2) заливали 3 мл дистиллированной воды. Затем в него засыпали 20 г смеси и прессовали стальным пуансоном до давления 10^2 МПа. Высота получаемой «мокрой» части образца составляла $h_w \approx 17,5 \div 18$ мм. Это соответствует относительной плотности запрессовки смеси $\approx 0,6$ и практически полному заполнению пор образца водой. Затем запрессовывали следующие 20 г смеси, получая уже «сухую» часть образца высотой ≈ 15 мм (относительная плотность $\approx 0,7$) с порами, заполненными воздухом. В результате формировали образец высотой $h_s \approx 33$ мм, имеющий «сухую» и «мокрую» части (см. рис. 2). Чтобы предотвратить возможное с течением времени «размытие» границы между «сухой» и «мокрой» частями образца, время от начала снаряжения лабораторной

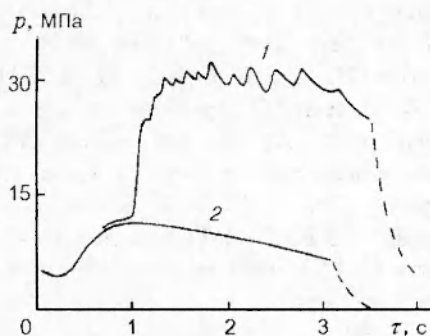


Рис. 4. Изменение давления газовой фазы в зоне фронта горения образца, содержащего в порах прессовки дистиллированную воду (1) и не содержащего включений (2)

сборки до момента сжигания образца максимально ограничивали (не больше 10 мин). Осциллограммы осевого усилия, получаемые при сгорании таких образцов, показывают, что горение «сухой» части образца протекает в обычном для таких образцов режиме (см. рис. 3). Горение же «мокрой» части образца сопровождается пульсирующими изменениями осевого усилия на фоне заметно большей его величины, чем при горении «сухого» образца. Наблюдаемое на осциллограммах достаточно резкое изменение осевого усилия при переходе горения от «сухого» участка образца к «мокрому» говорит о сохранении достаточно четкой границы между этими участками к моменту сжигания образца.

Анализ полученных осциллограмм с использованием соотношения (1) позволил построить графики изменения давления газовой фазы в зоне фронта горения «мокрых» и «сухих» образцов (рис. 4) и сделать следующие выводы.

1. Наличие воды в порах образцов снижает скорость горения в ≈ 2 раза (с 15 до 7 мм/с) и одновременно повышает давление газовой фазы в зоне фронта горения в ≈ 3 раза (с 10 до 30 МПа).

2. Наблюдаемые периодические пульсации давления дают основание классифицировать режим горения образцов, содержащих в порах воду, как автоколебательный.

3. Форма пульсаций давления в основном близка к ожидаемой (см. рис. 1). При этом амплитуда пульсаций давления на разных участ-

ках горения образца различна и находится в пределах $1 \div 3$ МПа, в то время как частота пульсаций по мере сгорания образцов устойчиво снижается с ≈ 7 (в начале) до ≈ 3 Гц (в конце горения образцов). Последнее может быть связано, во-первых, с перемещением вещества за фронтом горения образцов. Известно, что горение образцов может сопровождаться образованием за фронтом горения области пониженной плотности шлаков — волны разгрузки [7]. Такая же волна разгрузки появляется и при горении образцов в наших экспериментах (см. рис. 2). Причем глубина волны разгрузки по мере продвижения фронта горения по образцу возрастает. Это было установлено авторами настоящей работы в опытах по сжиганию образцов, содержащих метки из танталового порошка, в лабораторных сборках, просвечиваемых в момент горения образца импульсным рентгеновским аппаратом. Прогрессирующее перемещение вещества за фронтом горения в совокупности с наличием воды в порах образца приводит к автоколебательному режиму горения с ростом периода пульсаций по мере продвижения фронта горения. Во-вторых, не исключено влияние возможного изменения удельного содержания воды в порах прессовки по высоте «мокрой» части образца, обусловленного особенностями выбранного способа прессования смеси $Ti + C + 20\% TiC$ с водой, вследствие чего максимальное удельное содержание воды в порах прессовки должно реализовываться вблизи глухого торца образца.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ВНИИ экспериментальной физики (г. Саров) Н. М. Колобяниной, А. Г. Лещинской, И. В. Шевцовой и С. А. Другову за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шкадинский К. Г., Хайкин Б. И., Мержанов А. Г. Распространение пульсирующего фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7, № 1. С. 19–29.
2. Алдушин А. П., Мартемьянов Т. М., Мержанов А. Г. и др. Автоколебательное распространение фронта горения в гетерогенных конденсированных средах // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 5. С. 613–626.
3. Мержанов А. Г., Филоненко А. К., Боровинская И. П. Новые явления при горении конденсированных систем // Докл. АН СССР. 1973. Т. 208, № 4. С. 892–894.

4. Мержанов А. Г. Тепловые волны в химии. Черноголовка, 1978. (Препр. / АН СССР. ИСМ).
5. Леваков Е. В., Пелесков С. А., Сорокин В. П. Термозлектрический метод регистрации автоколебательного режима горения // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 18–22.
6. Голубев В. А., Бережко П. Г., Проскудин В. Ф., Малышев А. С. О возможности непрерывного измерения давления во фронте горения пиротехнических составов, дающих твердые продукты реакции // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 1. С. 67–70.
7. Голубев В. А., Бережко П. Г., Проскудин В. Ф. и др. О перемещении вещества воспламенителя и образца при горении безгазовых систем в жесткой оболочке // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 2. С. 93–97.
8. Гордополов Ю. А., Трофимов В. С., Мержанов А. Г. О возможности безгазовой детонации конденсированных систем // Докл. РАН. 1995. Т. 341, № 3. С. 327–329.

Поступила в редакцию 5/VI 1997 г.