

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

А. А. Баранов, В. Ф. Булдаков, Г. Г. Шелухин

Обеспечение оперативного воздействия на скорость горения гетерогенных конденсированных систем (ГКС) представляет в настоящее время значительный интерес. Метод регулирования скорости горения ГКС с помощью электрического поля [1, 2] является малоинерционным и достаточно простым в конструктивном оформлении. Однако при практическом его использовании отсутствуют надежные сведения о природе воздействия электрического поля на процесс горения, о наиболее приемлемых типах ГКС и т. д. Вследствие этого несомненное значение приобретает экспериментальное исследование влияния электрического поля на скорость горения конденсированных систем.

В настоящих опытах использовалась модельная система на основе перхлората аммония и полиуретанового каучука. Плоские образцы шириной 20 и толщиной 3 мм сжигались при атмосферном давлении. Обдув слабым потоком азота создавал торцевое горение. Воспламенение проводилось нихромовой спиралью; после перехода к установившемуся горению включалось электрическое поле.

В экспериментах изучалось влияние на процесс горения продольного постоянного поля, создаваемого источником высокого напряжения, который включал в себя повышающий трансформатор, выпрямитель и блок конденсаторов. Нижний электрод совмещался с державкой образца (без электрического контакта с образцом), а верхний — для свободного оттока газов — имел форму кольца таких размеров, чтобы поле в зонах горения было однородным.

Расстояние между электродами  $h$  варьировалось, но обычно составляло величину 65 мм. Максимальное напряжение  $\varphi$ , подаваемое на электроды, достигало 12 кВ. Протекающий в электрической цепи ток (во время горения ГКС) составлял 2—3 мА, что соответствует мощности  $\sim 40$  Вт на  $1 \text{ см}^2$  поверхности горения. Скорость горения измерялась с помощью кино съемки (кинокамера СКС-1М, скорость 400 кадр/с). Точность определения средней скорости горения составляет  $\sim 3\%$ .

Изменение средней скорости горения под действием поля представлено на рис. 1, где  $u_0$  — скорость невозмущенного горения,  $u$  — скорость горения под влиянием поля (установившееся значение). Можно отметить, что по мере роста напряженности поля скорость горения сначала уменьшается и при  $\varphi/h = 1 \div 1,5$  кВ/см достигает минимума, составляющего 65—75% исходного значения; при дальнейшем повышении напряженности скорость начинает возрастать и при  $\varphi/h > 2,5$  кВ/см превосходит свою начальную величину. Подобный характер изменения средней скорости горения сохраняется независимо от направления поля.

По существующим представлениям, влияние электрического поля определяется выделением в зонах горения джоулева тепла, наличием «ионного ветра» и воздействием на кинетику химических реакций [3].

Приведенные результаты показывают, что практически во всем исследованном диапазоне напряженностей выделение джоулева тепла решающего влияния на скорость горения не оказывает. В противном случае при повышении тем-

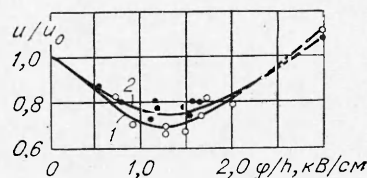


Рис. 1. Зависимость средней скорости горения от напряженности электрического поля.

1 — отрицательная полярность верхнего электрода; 2 — противоположное направление электрического поля.

пературы в зонах горения следовало бы ожидать увеличения скорости горения. Оценка этого механизма дает при потребляемых мощностях повышение температуры пламени на несколько градусов, что, очевидно, не может заметно повлиять на скорость горения.

Однако при повышенных значениях напряженности ( $\varphi/h > 2,5$  кВ/см) можно говорить, вероятно, о существенной роли тепловыделения за счет джоулева тепла (при  $\varphi/h = 3,5$  кВ/см затрачиваемая мощность достигает 1 кВт). Этот эффект объясняется пробоем пламенного промежутка, что отчетливо наблюдается на кинокадрах.

Влияние электрического поля на процесс горения посредством «ионного ветра» незначительно, что подтверждается одинаковым характером изменения скорости горения при различных направлениях поля. Этот механизм может объяснить лишь небольшую разницу изменения скорости (см. рис. 1). Таким образом, следует предположить, что электрическое поле влияет на скорость горения конденсированной системы через воздействие на кинетику химических реакций.

В настоящей работе зарегистрирован колебательный характер изменения скорости горения непосредственно после наложения поля, т. е. в переходный период между установившимися режимами горения без воздействия и с воздействием поля.

В результате полученных в опытах кинограмм были построены зависимости  $S(\tau)$  и  $u(\tau)$  ( $S$  — перемещение поверхности горения,  $\tau$  — время). При достаточно малом промежутке осреднения (0,03 с и меньше) на протяжении всего графика (рис. 2) можно выделить отдельные мелкомасштабные циклы со средней продолжительностью  $T_k = 0,3$  с, т. е. с частотой  $\sim 3$  Гц, в каждом из которых чередуются перемещения с большей и меньшей скоростью. Эти циклы отражают локально-колебательный характер горения [4].

После наложения поля (в момент  $\tau_1$ ) функции  $S(\tau)$  и  $u(\tau)$  приобретают еще одну периодическую составляющую с периодом  $T_n = 0,6$ —0,8 с, т. е. с более низкой частотой, чем при локально-колебательном

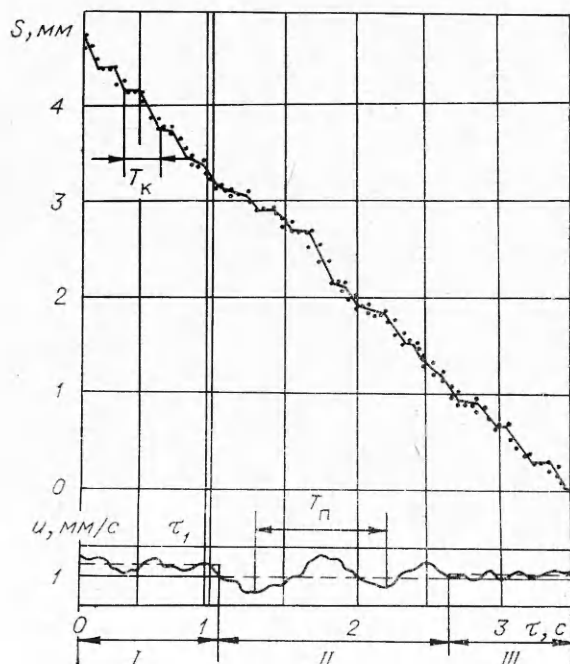


Рис. 2. Перемещение поверхности горения в функции времени.

горении. Эти колебания характерны для переходного режима. Вскоре после подачи поля в зоны горения (примерно 0,1 с) начинается уменьшение скорости горения до 30—35% по сравнению с исходной (при  $\varphi/h = 1,25$  кВ/см), затем происходит увеличение до максимума  $(1,0 \div 1,1)u_0$  и снова спад до 60—65% от начального значения.

Мелкомасштабные колебания, характерные для невозмущенного горения, накладываются в переходном режиме на крупномасштабные (низкочастотные). Амплитуда последних, как уже отмечено, постепенно уменьшается и становится сравнимой с амплитудой мелкомасштабных колебаний, что означает конец пере-

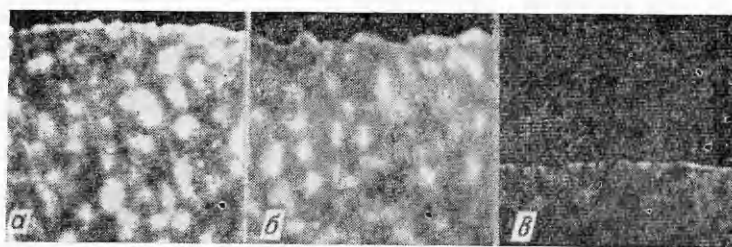


Рис. 3. Фотографии поверхности горения.

а) до воздействия электрического поля; б) через 0,2 с после наложения поля; в) через 2 с после наложения поля.

ходного режима. Обычно в опытах фиксировалось два (редко три) цикла низкочастотных колебаний.

Таким образом, представленные на рис. 2 зависимости могут быть разбиты по времени на три участка: *I* — невозмущенное горение, *II* — переходный режим, *III* — установившееся горение под воздействием электрического поля. Среднее значение скорости горения в переходном режиме на 10—15% меньше, чем во втором стационарном режиме, т. е.  $u_0 = u_I > u_{II} > u_{III}$ . Декремент затухания колебаний скорости горения в настоящих опытах составил 0,5—0,7 1/с.

Для выяснения природы воздействия поля на процесс горения ГКС важное значение может иметь тот факт, что под его влиянием меняется профиль поверхности горения. До наложения поля вид поверхности довольно гладкий (рис. 3, а). После включения поля вид поверхности изменяется, она становится неровной, изрытой (рис. 3, б,  $\tau = \tau_1 + 0,2$  с). Размер таких неровностей составляет в среднем 0,2 мм. После завершения переходного режима профиль поверхности приобретает первоначальный вид (рис. 3, в).

Для более детального изучения влияния поля на процесс горения с помощью метода излучения — поглощения были экспериментально определены максимальная температура пламени  $T_{\max}$ , расстояние  $H$  от поверхности горения до плоскости, на которой она достигается (толщина реакционной зоны), коэффициент поглощения пламени на этой высоте  $\epsilon$ . Осреднение проводилось по площади  $0,2 \times 0,01$  мм<sup>2</sup>. При невозмущенном горении средние значения этих параметров:  $T_{\max} = 2100$  К,  $H_0 = 0,11$  мм,  $\epsilon = 0,55$ .

После наложения поля происходит резкое кратковременное изменение всех величин (рис. 4). В течение  $\sim 0,1$  с повышается температура с 2100 К до 2500 и одновременно повышается прозрачность пламени:  $\epsilon$  падает с 0,55 до 0,15. Более медленно, чем  $T_{\max}$  и  $\epsilon$  возрастает в этот период толщина реакционной зоны; она достигает своего максимального значения ( $\sim 2,5H_0$ ) через 0,2 с.

Более быстрое увеличение температуры, чем расстояния приводит, очевидно, к дополнительному притоку тепла из газовой фазы в конденсированную (по сравнению с невозмущенным горением). Подтверждением этому служит отмеченное в ряде экспериментов повышение скорости горения в этот момент на 10—20%. После окончания этого аномального периода  $T_{\max}$ ,  $\epsilon$ ,  $H$

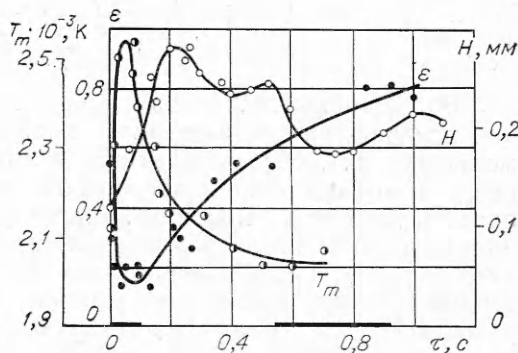


Рис. 4. Характер изменения параметров газовой зоны после наложения электрического поля.

релаксируют к установившемуся значению, причем  $T$  — существенно колебательным образом, синфазно с колебаниями скорости горения в переходном режиме (периоды повышенной скорости горения отмечены на оси времени утолщенными линиями).

Рассмотренный характер поведения  $T_{\max}$ ,  $\epsilon$ ,  $H$  сохраняется при смене полярности на электродах.

Увеличение толщины реакционной зоны при практически неизменной температуре (в невозмущенном и установившемся под действием поля режимах) свидетельствует, по нашему мнению, о том, что электрическое поле замедляет скорость химических реакций.

Резкое изменение  $T_{\max}$  и  $\epsilon$  в момент  $\tau_1$  связано, вероятно, с диспергированием вещества с поверхности горения. Напомним, что рис 3, б иллюстрирует профиль поверхности горения, существующий непосредственно после экстремального возрастания этих параметров. Размеры неровностей на поверхности соответствуют размерам крупных кристаллов перхлората аммония. По-видимому, при включении поля происходит дополнительный унос частиц окислителя в газовую фазу. В результате отмеченные резкие изменения  $T_{\max}$  и  $\epsilon$  можно объяснить дополнительной подачей окислителя к продуктам реакции, что должно обеспечить их более полное сгорание, т. е. привести к повышению температуры и увеличению прозрачности пламени.

Ленинградский механический  
институт

Поступила в редакцию  
12/V 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. P. J. Mayo, L. A. Watermeier, F. J. Weinberg. Proc. Roy. Soc., 1965, A, 1399.
2. R. F. Bestgen, H. E. Wright. AIAA Paper, № 71—174.
3. Е. М. Степанов, Б. Г. Дьячков. Ионизация в пламени и электрическое поле. М., «Металлургия», 1968.
4. Г. Г. Шелухин, В. Ф. Булдаков, В. П. Белов. ФГВ, 1969, 5, 1.

### О ВЛИЯНИИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПЕРВОГО РОДА НА КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

С. Л. Харатян, З. Г. Вакина, Ю. М. Григорьев

Большинство металлов в процессе нагревания претерпевает фазовые превращения первого рода (плавление, изменение кристаллической модификации), сопровождающиеся поглощением тепла. При воспламенении подобных систем поглощение тепла при фазовом переходе может оказать заметное влияние на характеристики воспламенения (периоды индукции, предел воспламенения), что связано с изменением теплового баланса в процессе развития теплового самовоспламенения. В настоящей работе проведен расчет в рамках теории [1] критических условий воспламенения частиц металлов в нагретом газе или нитях, нагреваемых электрическим током в потоке газа [2], для подобных режимов воспламенения при наличии защитных пленок продуктов реакций, образующихся в процессе реагирования металла с окислителем.