

ЛИТЕРАТУРА

1. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений.— М.: Мир, 1964.
2. Коваленко А. Д. Термоупругость.— Киев: Наук. думка, 1975.
3. Виллюнов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ.— Новосибирск: Наука, 1984.
4. Даниловская В. И. // ИФЖ.— 1961.— 1, № 4.— С. 342.
5. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости.— М.: Мир, 1970.
6. Буркина Р. С., Виллюнов В. Н. Асимптотика задач теории горения.— Томск: Изд-во Том. ун-та, 1982.
7. Васильева А. Б., Бутузов В. Т. Асимптотические разложения решений сингулярно-возмущенных уравнений.— М.: Наука, 1973.
8. Виллюнов В. Н. К тепловой теории зажигания // ФГВ.— 1966.— 2, № 2.— С. 77—82.
9. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования.— М.: Наука, 1971.

г. Томск

Поступила в редакцию 13/ХП 1990

УДК 536.46

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

О ВЛИЯНИИ УСАДКИ ШЛАКОВ ПОДЖИГАЮЩЕЙ ТАБЛЕТКИ НА ПАРАМЕТРЫ ЗАЖИГАНИЯ

На примере безгазовой системы $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} + 4\text{V}$ показано, что усадка шлаков поджигающей таблетки, протекая достаточно быстро, может оказывать существенное влияние на параметры зажигания, зависящие в том числе и от высоты таблетки.

Иницирование реакции горения безгазовой системы тепловой волной горящего воспламенителя, имеющее важное практическое значение, изучено достаточно подробно [1—8]. Но во всех работах рассмотрен только один частный случай, когда во время всего процесса перехода волны горения через границу раздела поджигающая таблетка — образец продукты сгорания воспламенителя неподвижны. Вместе с тем известно, что горение базгазовых систем может сопровождаться перемещением вещества (как самопроизвольным [9], так и вынужденным [10]), а для многих систем характерна усадка образовавшегося продукта [11] (т. е. перемещение вещества уже после сгорания).

Указанные обстоятельства применительно к поджигающей таблетке ставят ряд вопросов, связанных с вероятными существенными изменениями условий передачи тепла в поджигаемый образец. В частности, на параметры зажигания большое влияние может оказывать усадка шлаков поджигающей таблетки, если время протекания этих двух процессов окажется одного порядка (например, из-за наличия между воспламенителем и поджигаемым образцом инертной преграды).

Для экспериментального изучения процесса усадки и его влияния на параметры зажигания выбрана безгазовая система $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} + 4\text{V}$, которую получали путем тщательного перемешивания исходных порошкообразных компонентов в шаровой мельнице. Лабораторная сборка для сжигания (рис. 1, а) состояла из стального цилиндра 4, где в донной части установ-

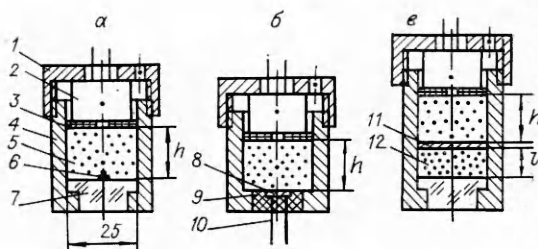


Рис. 1. Лабораторные сборки для сжигания.

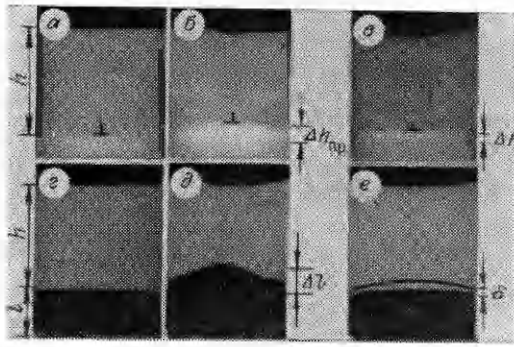


Рис. 2. Рентгеновские снимки лабораторных сборок.

выделяющихся при горении таблетки, между ней и вкладышем располагали стальную сетку 3, а в гайке 1 делали дополнительное отверстие.

Лабораторные сборки просвечивали импульсным рентгеновским аппаратом МИН (время экспозиции десятки наносекунд). По изменению положения танталовой метки на рентгеновских снимках, сделанных до (рис. 2, а) и после опыта (рис. 2, б), находили предельную величину линейной усадки шлаков таблетки в осевом направлении $\Delta h_{пр}$, а текущее значение линейной усадки Δh определяли с помощью снимков (рис. 2, в), сделанных через определенный промежуток времени Δt после выхода фронта горения на торцевую поверхность таблетки, что фиксировалось фотодиодом, расположенным за вставкой лабораторной сборки. Измерения $\Delta h_{пр}$ и Δh относятся к зоне, близкой к оси таблетки, на периферии усадка заметно меньше.

Характерная особенность — в результате усадки зазор появляется именно в зоне предполагаемого контакта шлаков таблетки и зажигаемого образца. Как видно из полученных характеристик процесса усадки (рис. 3), этот зазор, определяемый величиной Δh , образуется довольно быстро и имеет значительные размеры. Так, через ~ 10 мс после сгорания таблетки высотой 20 мм зазор становится равным $\sim 0,5$ мм, возрастая в пределе до ~ 3 мм. Появление зазора практически сразу же после сгорания таблетки должно приводить к резкому снижению теплового потока из продуктов реакции таблетки в зажигаемый образец, причем чем больше высота таблетки, тем больше (вследствие возрастания Δh) должно быть снижение величины теплового потока.

Последнее подтверждено экспериментально в опытах с использованием лабораторной сборки, содержащей тепломер — стальной диск 8, вклеенный в теплоизолятор 9 из текстолита (рис. 1, б). Полученные с помощью термопары 10 кривые изменения во времени температуры нагрева диска тепломера, имеющего диаметр 7 и толщину 0,8 мм (рис. 4), показывают, что по мере увеличения высоты таблетки от 1 до 20 мм снижается начальная скорость поступления тепла в тепломер и одновременно увеличивается общее его количество, накапливающееся в тепломере в течение всего процесса. Это наглядно показывают графики зави-

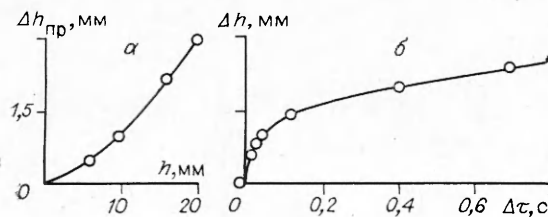


Рис. 3. Зависимости линейной усадки шлаков таблетки от ее высоты (а) и времени (б).

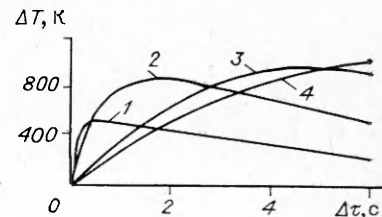
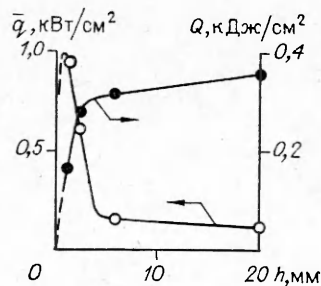


Рис. 4. Изменение температуры диска тепломера во времени. h , мм: 1 — 1, 2 — 2, 3 — 6, 4 — 20.

Рис. 5. Зависимости теплового потока и количества тепла, поступающих в тепломер из шлаков таблетки, от ее высоты.



симости от высоты таблетки величин \bar{q} и Q (рис. 5), оцениваемых в первом приближении по соотношениям

$$\bar{q} = \frac{mc}{s} \frac{\Delta T}{\Delta t}, \quad Q = \frac{mc}{s} \Delta T_{\max},$$

где \bar{q} — среднее значение удельного теплового потока в течение времени Δt , отсчитываемого от момента сгорания таблетки (принимали $\Delta t = 0,1$ с); Q — удельное количество тепла, поступившее в тепломер; m , c , s — масса, удельная теплоемкость и площадь торцевой поверхности диска тепломера соответственно; ΔT — изменение температуры диска тепломера за время Δt ; ΔT_{\max} — максимальное изменение температуры диска тепломера.

Из графиков следует, что существует оптимальная величина высоты поджигающей таблетки (соответствующая в данном случае примерно 2 мм), при которой, с одной стороны, сохраняется еще достаточно высокое значение теплового потока, обеспечивающее малое время задержки воспламенения, а с другой — достигается близкое к максимальному количество отдаваемого шлаками таблетки тепла, гарантирующее надежное зажигание образца.

Результаты опытов по зажиганию прессованных образцов 12 длиной l из смеси Nb+V через стальную преграду 11 толщиной 0,4 мм таблетками 5 разной высоты из смеси $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} + 4\text{V}$ (рис. 1, в) также подтверждают существование некоторого оптимального значения h . Так, если $h = 2$ мм, воспламенение образца происходит с задержкой 0,8 с, то при $h = 20$ мм задержка возрастает до 1,5—2 с. Задержку рассчитывали как разность между суммарным временем, определяемым от момента действия таблетки до момента сгорания образца, и временем, необходимым для сгорания таблетки и образца. Последнее определяли с учетом предварительно найденной зависимости времени горения прессованных образцов из смеси Nb+V от величины их удлинения Δl при горении. Значение Δl получали, сравнивая рентгеновские снимки лабораторных сборок, сделанные до (рис. 2, з) и после опыта (рис. 2, д).

Рентгеновское просвечивание лабораторныхборок с большой таблеткой ($h = 20$ мм) во время протекания процесса зажигания (через ~1 с после сгорания таблетки) показывает наличие зазора δ между образцом и стальной преградой, которая из-за неравномерного нагрева выгибается в сторону сжимающихся шлаков таблетки (рис. 2, е). Появление такого зазора как раз и обуславливает увеличение времени задержки воспламенения образца с ростом h . Уменьшение же высоты таблетки менее 2 мм в результате резкого снижения количества тепла, отдаваемого раскаленными шлаками этой таблетки, приводит к тому, что при $h \leq 1$ мм образец уже не воспламеняется.

Итак, усадка шлаков поджигающей таблетки оказывает заметное влияние на параметры зажигания, которые в определенных пределах можно регулировать путем изменения высоты таблетки, находя при необходимости требуемый оптимум.

ЛИТЕРАТУРА

1. Струнина А. Г., Мартемьянова Т. М. и др. Зажигание безгазовых систем волной горения // ФГВ.— 1974.— 10, № 4.

2. Ермаков В. И., Струнина А. Г., Барзыкин В. В. Экспериментальное исследование процесса зажигания безгазовых систем волной горения // Там же.— 1976.— 12, № 2.
3. Струнина А. Г., Ваганова Н. И., Барзыкин В. В. Энергетический анализ процесса зажигания безгазовых систем волной горения // Там же.— 1977.— 13, № 6.
4. Струнина А. Г., Ермаков В. И., Барзыкин В. В. Влияние теплотерь и теплофизических параметров на процесс зажигания безгазовых систем волной горения // Там же.— 1978.— 14, № 4.
5. Ермаков В. И., Струнина А. Г., Барзыкин В. В. Экспериментальное исследование влияния теплотерь на процесс зажигания безгазовых систем волной горения // Там же.— № 6.
6. Костин С. В., Струнина А. Г., Барзыкин В. В. Приближенный анализ режимов иницирования в составных зарядах гетерогенных систем // Там же.— 1986.— 22, № 1.
7. Костин С. В., Струнина А. Г., Барзыкин В. В. Влияние теплофизических параметров на устойчивость волны горения при переходе через границу раздела безгазовых систем // Там же.— 1987.— 23, № 6.
8. Крайнов А. Ю. Влияние теплофизических характеристик инертной преграды и теплотерь на распространение волны горения // Там же.
9. Мержанов А. Г. Закономерности и механизм горения пиротехнических смесей титана и бора // АН СССР. ОИХФ.— Препр.— Черногловка, 1978.
10. Смоляков В. К. К теории горения безгазовых систем в условиях действия постоянной нагрузки // ФГВ.— 1989.— 25, № 5.
11. Подергин В. А., Неронов В. А. и др. // Процессы горения в химической технологии и металлургии/Под ред. А. Г. Мержанова— Черногловка, 1975.

г. Москва

Поступила в редакцию 27/XI 1990

УДК 536.46 : 533.6 + 534.222.2

С. К. Асланов, В. Э. Волков

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛАМИНАРНОГО ПЛАМЕНИ

Построена теория гидродинамической устойчивости ламинарного плоского пламени в вязком газе, в основе которой лежит последовательный интегральный метод анализа развития возмущений. Учитывается взаимодействие возмущений с пламенной зоной и изменение ее ширины. Получена аналитическая оценка критического числа Рейнольдса, совпадающая с данными известных экспериментов как для быстрогорящих (кислородных), так и для медленногорящих (воздушных) смесей.

Экспериментальным путем доказано [1—3], что неустойчивость нормального горения развивается с некоторого критического числа Рейнольдса Re_* . Известный вывод Л. Д. Ландау об абсолютной неустойчивости разрывной схемы пламени в идеальной среде [4] в принципе может служить лишь качественным объяснением наблюдаемых явлений [1—3], так как отсутствие вязкости ($\nu = 0$) позволяет говорить только о числах $Re \gg 1$. Количественное же согласование теоретических результатов и опытов требует прежде всего учета вязкости как основного стабилизирующего фактора, а значит и определенной протяженности зоны горения.

Теоретический анализ устойчивости плоского пламени привел к результатам, значительно расходящимся с экспериментальными [5, 6] и даже им противоречащим [7]. Другие оценки гидродинамической устойчивости пламени, приведенные в [8], также не дали количественного объяснения наблюдаемых явлений. В [9] исследование устойчивости ламинарного плоского пламени конечной протяженности проведено с позиций гидродинамики вязкой среды. Полученные результаты были ближе к данным опытов [1—3] по сравнению с работами [5—8].

Однако заниженность теоретического значения Re_m критического числа Рейнольдса опять-таки свидетельствует о наличии дополнительных факторов стабилизации, не учтенных в теории [9]. К ним могут