

ры волны горения от различных безразмерных параметров, в которые входят давление, размер частиц и другие определяющие скорость горения величины, а также сопоставление данных расчета с экспериментом.

*Поступила в редакцию
29/XII 1977*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев. ЖФХ, 1938, 12, 94.
2. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 498.
3. А. Г. Мержанов. Стационарное горение гомогенных конденсированных систем. Препринт ИХФ АН СССР, 1967.
4. Ракетные топлива. М., «Мир», 1975.
5. Н. Н. Бахман, Д. П. Поликарпов. Изв. АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика, 1961, 4, 37.
6. Н. Н. Бахман. Докл. АН СССР, 1959, 129, 5, 1079.
7. W. Nachbar. Solid Propellant Rocket Research (ed M. Summerfield). N. Y., Academic Press, 1960.
8. В. Б. Либрович. ПМТФ, 1962, 4, 33.
9. Б. В. Новожилов. ЖФХ, 1962, 36, 11, 2508.
10. W. Nachbar, A. B. Cline. 5-th AGARD Colloquium, Macmillan Co, 1963.
11. С. С. Новиков, П. Ф. Похил и др. Докл. АН СССР, 1967, 174, 1129.
12. Б. С. Ермолаев, А. И. Коротков, Ю. В. Фролов. ФГВ, 1969, 5, 2, 286; 1970, 6, 3, 277.
13. N. N. Vakhman, V. B. Librovich. Comb. and Flame, 1970, 15, 143.
14. W. S. Strahle. AIAA Paper, № 74-123.
15. T. L. Boggs. Combustion Science and Technol, 1972, 4, 279.
16. A. M. Varney, W. S. Strahle. Comb. Sci and Techn., 1972, 4, 5, 1971.
17. Б. И. Хайкин. Четвертый Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Аннотации докладов. Черногловка, 1974.
18. H. E. Jones, W. S. Strahle. 14-th Symposium (Int.) on Combustion. The Combustion Institute, 1973, p. 1287.
19. О. П. Коробейничев, Г. И. Анисифоров, А. Г. Терешенко. РТК, 1975, 5, 112.
20. G. D. Sammons. AIAA Paper, № 69-504.
21. R. H. Waesche, J. Wenograd. AIAA Paper, № 68-145.
22. О. П. Коробейничев, А. М. Викторенко и др. ФГВ, 1974, 10, 3, 345.
23. С. Херманс. РТК, 1966, 4, 9, 160.
24. М. Бекстед, Р. Дерр, К. Прайс. РТК, 1970, 8, 12, 107.
25. M. L. Summerfield et al. AIAA Paper, № 68-658.
26. R. N. Kumar. Comb. Sci. and Technol., 1973, 8, 133.
27. Г. Б. Манелис, В. А. Струнин. Механизм и элементарная теория горения смесевых топлив. Препринт. Черногловка, 1975.
28. В. А. Струнин, А. Н. Фирсов и др. ФГВ, 1977, 13, 1, 3.
30. О. П. Коробейничев, К. К. Коваленко, А. И. Лесникович. ФГВ, 1977, 13, 4, 550.
31. О. П. Коробейничев, А. А. Зенин и др. ФГВ, 1977, 13, 3, 355.

О КОНВЕКТИВНОМ ГОРЕНИИ ДИСПЕРГИРУЮЩИХ СИСТЕМ

В. Г. Коростелев, Ю. В. Фролов

(Москва)

Конвективное горение пористых газопроницаемых систем интересно тем, что позволяет получить скорости сгорания, значительно превращающие скорости нормального горения. Однако такой режим в обычных условиях, как правило, не устойчивый и очень быстро переходит в детонацию [1, 2]. Поэтому в последнее время активно обсуждаются методы стабилизации и регулирования конвективного горения.

Особый интерес вызывает вопрос об условиях существования стационарного режима горения. Впервые возможность стационарного горения теоретически рассмотрена в [3, 4]. Выяснено [5], что рассмотренный в [3] режим горения не является строго конвективным, поскольку к-фаза в этом режиме прогревается не продуктами горения, а газом, находившимся в порах до начала горения и разогреваемым за счет быстрого сжатия перед зоной горения. Давление, при котором может существовать этот режим, достигает нескольких килобар. В [4] за источник нагретого газа принимается сама зона горения, из которой в результате фильтрации он перетекает в зону прогрева. Таким образом, в [3, 4] получены, по существу, различные режимы горения. Первый из них можно считать конвективно-волновым, второй — конвективно-фильтрационным или просто конвективным.

При постоянных внешних условиях и одномерном развитии процесса природа конвективного горения предполагает его затухающий характер, так как постоянное перетекание газа в зону прогрева приводит к накоплению его перед зоной горения (созданию «газовой пробки») и торможению процесса. Поэтому для обеспечения стационарного режима необходимо найти механизм, который препятствовал бы уменьшению градиента давления газа в зонах конвективного горения. Согласно работе [6], для преодоления сопротивления постоянно растущей газовой пробки предлагается непрерывно увеличивать давление в зоне горения по определенному закону. В [7] используется модель двойной пористости к-фазы. Считается, что горение распространяется преимущественно по крупным порам, а мелкие, занимающие подавляющую часть порового пространства, служат объемом для стока газа из крупных пор. Этим обеспечивается постоянство (в среднем) массы газа в крупных порах и незатухающий характер горения.

Еще один механизм стабилизации, реально присущий конвективному горению пористых систем, состоит в диспергировании к-фазы. Проникновение высокотемпературных продуктов горения в поры и развитие химической реакции на поверхности горения к-фазы приводит к их газификации, быстрому росту давления в порах, разрушению механической связи между отдельными зернами и уносу вещества во внешний объем, где происходит его догорание. Стабилизирующая роль диспергирования отмечалась и раньше [8]. При этом считалось, что механизм стабилизации заключается только в ограничении роста давления в порах. Однако само по себе ограничение давления не исключает накопления газа перед зоной горения, а следовательно, и затухания процесса. В действительности же, как показывает эксперимент [4], даже при постоянстве внешнего давления, когда влияние диспергирования проявляется в полной мере, затухания горения, как правило, не наблюдается.

Говоря о диспергировании, необходимо учитывать, что его особенности во многом определяются прочностными свойствами к-фазы. В системах с насыпной плотностью диспергирование происходит практически непрерывно под действием небольшого по величине градиента давления в области отрыва частиц. В таких системах при постоянном внешнем давлении диспергирование не препятствует накоплению газа перед зоной горения, поэтому конвективное горение должно затухать. Предотвратить затухание может запираание потока в оттекающем во внешний объем газа [7] или неоднородность развития процесса. Экспериментально стационарного горения в образцах насыпной плотности не наблюдалось. В теории горения для систем с непрерывным характером диспергирования [9] стационарный режим получен только для случая конвективно-волнового горения.

Разрушение и диспергирование в системах (например, прессованных) с прочными связями между отдельными частицами становятся

возможными только при значительном (до десятков атмосфер) перепаде давлений между зоной горения и внешней средой. Но поскольку диспергирование происходит в области с максимальной скоростью газовой выделения, а ширина зоны горения обычно не намного превышает размер диспергируемых частиц [4], то после их отрыва давление в порах резко падает. Оставшаяся часть зоны горения не способна сразу компенсировать это падение. В результате диспергирование прекращается до момента восстановления уровня газовой выделения в зоне горения. Таким образом, диспергирование в прочных системах происходит отдельными порциями (дискретно), что и наблюдается экспериментально [10]. Время восстановления газовой выделения в зоне горения в таких системах, в отличие от насыпных, может превышать время фильтрационной релаксации этой зоны, вследствие чего после диспергирования волна разгрузки выходит за пределы зоны горения, что вызывает колебания массы газа перед этой зоной, нестационарность прогрева к-фазы и пульсации скорости ее воспламенения. При этом диспергирование может происходить с постоянной частотой.

В работе [4] учтена дискретность диспергирования к-фазы, но в то же время указывалось на получение режима конвективного горения, распространяющегося с постоянной скоростью. Дело в том, что программа расчета включала усреднение всех параметров процесса за время между последовательными моментами диспергирования. Но поскольку средняя скорость горения за этот период оказалась постоянной, пульсирующий режим конвективного горения был представлен в виде квазистационарного с постоянной средней скоростью распространения.

Для выяснения особенностей механизма, обеспечивающего постоянство средней скорости горения, рассмотрим влияние дискретного диспергирования к-фазы на динамику процессов во всех зонах конвективного горения.

Напомним, каким образом учитывается в рассматриваемой модели [4, 11] диспергирование: слой к-фазы (0,4 мм) после выгорания на определенную величину (5%) гаснет (диспергирует) и дает начало образованию каркаса. Каркас создает сопротивление оттоку газа во внешний объем, моделируя в какой-то мере догорание образующейся взвеси частиц. После образования каркаса определенной длины (5 слоев) его рост прекращается и в дальнейшем, несмотря на выгорание новых слоев к-фазы, он остается неизменным (один слой переходит в каркас, один отбрасывается). Это обеспечивает постоянство условий на границе внешнего объема и пористой среды.

Анализ показывает, что при дискретном характере диспергирования вблизи сечения отрыва частиц к-фазы происходит периодическое изменение направления течения газа в порах. Границей области оттока газа из пор является сечение с максимальным давлением («контрольное сечение»). Отрыв каждого очередного слоя к-фазы вызывает колебания давления в зоне горения и приводит к колебательным перемещениям «контрольного сечения» (от него газ оттекает в разные стороны). При своем движении в глубь к-фазы это сечение выходит за пределы зоны горения и создает возможность оттока газа во внешний объем из зон прогрева и фильтрации.

Соотношение между массой втекающего и вытекающего из пор газа может быть различным. В случае горения с постоянной средней скоростью за период колебаний давления в зоне горения между ними устанавливается равновесие.

Рассмотрим этот процесс более детально с привлечением графического материала. На рис.1, а показан момент непосредственно перед «диспергированием» очередного слоя к-фазы. Контрольное сечение находится в зоне горения, которая определяется как расстояние от фронта газификации к-фазы до каркаса. Там же происходит и наи-

более интенсивный теплообмен ($\alpha\Delta T = \max$) между газом и к-фазой. Но максимум плотности газа расположен в зоне прогрева.

После диспергирования (см. рис. 1, б) газовыделение в зоне горения резко уменьшается. Это вызывает перестройку в зонах конвективного горения под новый уровень газовой выработки: давление падает, его максимум перемещается вперед (в глубь к-фазы), выходя за пределы зоны горения, в результате чего отток газа происходит из все большего объема пор. При этом, несмотря на то, что интенсивность теплообмена в целом уменьшается, прогрев зоны горения не прекращается. Максимум плотности газа продолжает расти вплоть до момента совмещения сечения, где он расположен, с контрольным сечением. После этого дальнейшее движение контрольного сечения в глубь к-фазы прекращается (см. рис. 1, в), а максимальное значение плотности газа резко уменьшается за счет оттока накопившегося газа во внешний объем. По мере прогрева области к-фазы, прилегающей к каркасу, развития в ней реакции и роста давления начинается обратное перемещение контрольного сечения в сторону каркаса. Отток газа из пор сначала уменьшается, а затем совсем прекращается (см. рис. 1, г). Перед зоной горения вновь начинает накапливаться газ.

Рассмотренная картина в случае устойчивого распространения горения периодически повторяется и к моменту диспергирования очередного слоя к-фазы профили ведущих параметров воспроизводятся со сдвигом на число диспергированных слоев. Согласно проведенным расчетам, период колебаний контрольного сечения равен $5,75 \cdot 10^{-5}$ с, а амплитуда колебаний равна 1,8 мм. За период колебаний время движения вперед (в глубь к-фазы) составляет $2,45 \cdot 10^{-5}$ с, назад — $8,5 \cdot 10^{-6}$ с. Остальное время ($2,45 \cdot 10^{-5}$ с) контрольное сечение находится в крайних положениях. За это время происходит отток газа из сечения с максимальной плотностью, а также восстановление необходимого для диспергирования градиента давления в порах.

Рассмотрим динамику процессов относительно координат, движущихся со средней скоростью конвективного горения (штриховая линия на рис. 1). В этом случае можно выделить три области течения газа (см. рис. 1, а): *I* — движение (отток) газа во внешний объем, *II* — движение (переброска) газа в глубь к-фазы, *III* — движение газа по направлению к зоне горения. В областях *I* и *II* газ движется в противоположных направлениях, поэтому перед диспергированием на их границе плотность газа минимальна. На границе областей *II* и *III*, в которых потоки движутся навстречу друг другу, наоборот, наблюдается максимум плотности газа.

Зона *II* обязана своим существованием действию источника газобразных продуктов в зоне горения, мощность которого, в свою очередь, зависит от количества тепла, передаваемого к-фазе в этой области. После диспергирования в связи с резким снижением газовой выработки переброска газа вперед уменьшается вплоть до полного прекращения (см. рис. 1, б). В результате область *II* исчезает и отток происходит из всей ранее занимаемой ею области. На границе зон *I* и *III* скорость газа становится равной нулю, накопление газа прекращается и начинается его отток из области *III*. Часть газа, оттекая из зоны *II*, движется в сторону увеличения давления, т. е. тормозится. Торможение прекращается после полного рассасывания накопленного при переброске газа. Это происходит при перемещении контрольного сечения в крайнее правое положение — на границу области переброски.

Следует отметить, что в это время в зоне *III* сохраняется вполне определенная для данной системы масса газа. Она образуется из газа, находившегося в порах до начала горения, и газа, поступающего в них из зоны горения. В начальный период при формировании зон конвективного горения, когда масса газа в области *III* еще мала и не соответ-

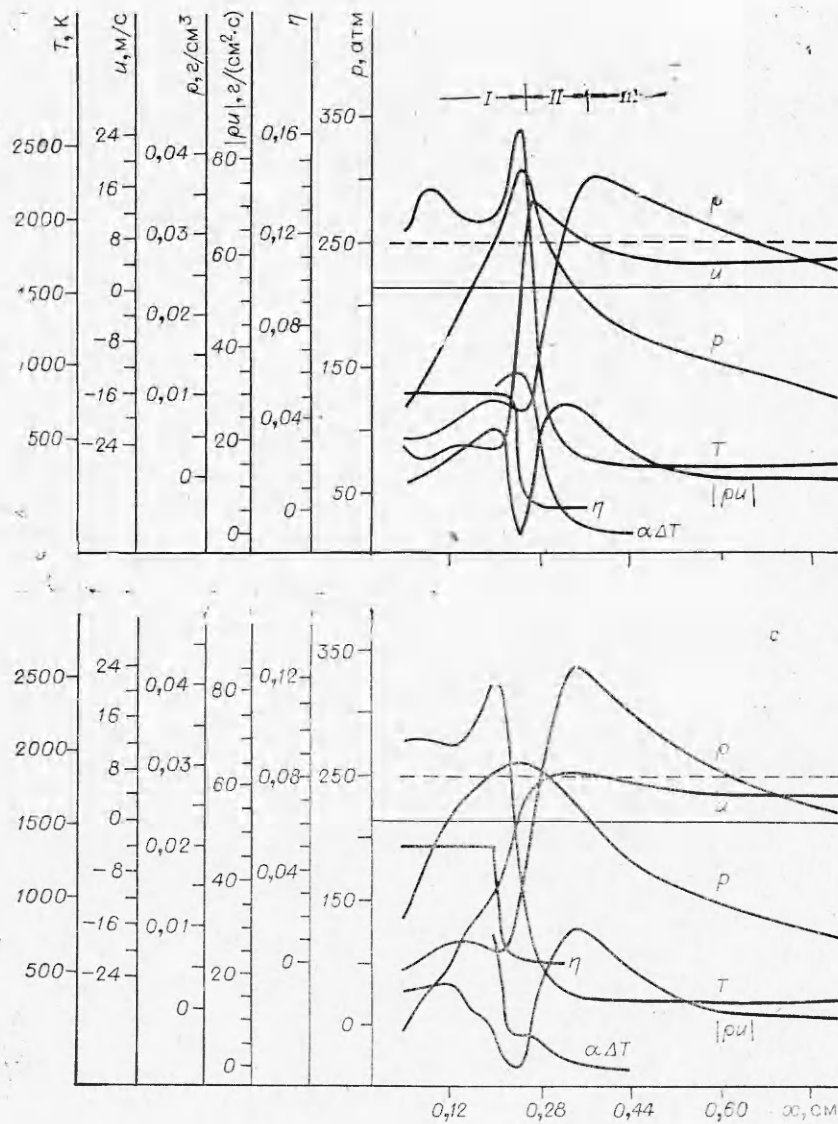
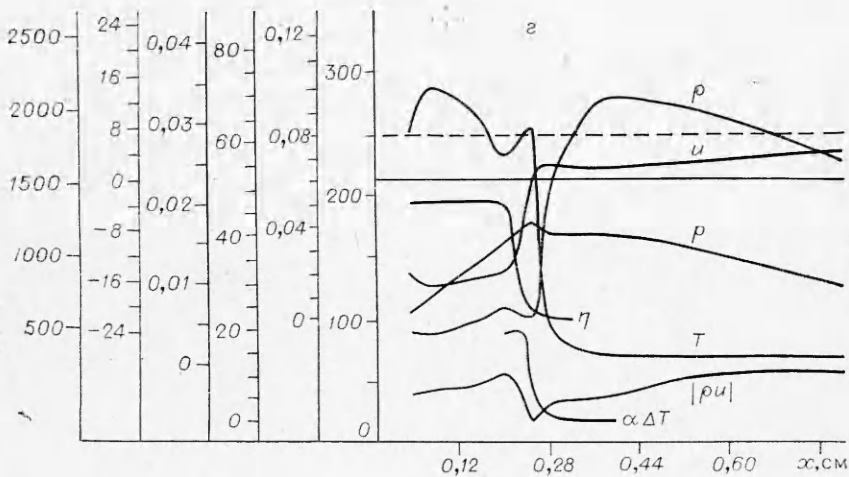
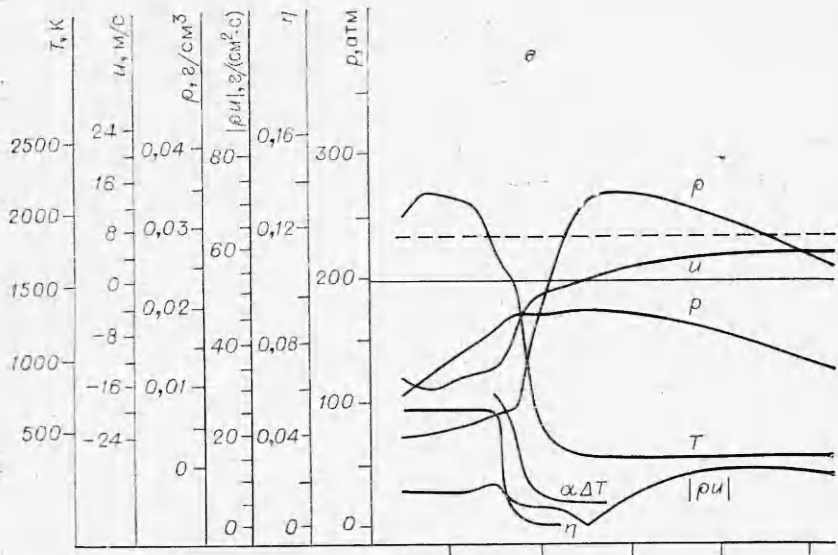


Рис. 1. Распределение давления p , температуры T , плотности ρ , скорости газа конвективного горения ($p=100$ ат, $T=2800$ К, $T_n=300$ К, а) перед диспергированием к-фазы; б) в конце «переброски» газа из зоны горения; новлением

стает мощности источника, контрольное сечение при движении вперед не достигает границы области переброски, поэтому происходит постоянное заполнение пор. Однако оно идет лишь до определенного предела, так как при избытке газа (точнее, при превышении некоторой критической, соответствующей мощности источника, величины ρu на границе областей II и III) волна разгрузки начинает захватывать и область III. Таким образом, после стабилизации внешних условий (каркас полностью сформирован) через некоторое время автоматически устанавливается динамическое равновесие между потоками газа за период колебаний давления в зоне горения (за время релаксации газовыделения в этой зоне), и масса газа в зоне III в среднем стабилизируется. Одновременно с этим становится возможной и стабилизация средней скорости конвективного горения (рис. 2).



u , массовой скорости газа ρu , выгорания к-фазы η и величины $\alpha \Delta T$ в зонах $p_H = 1$ ат, $m = 0,2$, $E = 20$ ккал/моль, $k_0 = 10^{12}$ см/с).

в) при максимальном перемещении волны разгрузки в глубь к-фазы; г) перед возоб-
 переброски газа.

При колебаниях внешнего давления (периодический сброс всего каркаса после «диспергирования» пяти слоев к-фазы) изменяется и средняя скорость конвективного горения. Накопление и рассасывание газа перед зоной горения в этом случае контролируются уже диспергированием не каждого слоя, а всего каркаса, т. е. изменениями внешнего давления. После того как в среднем (за период колебаний внешнего давления) масса газа перед зоной горения перестает изменяться, происходит стабилизация амплитуды колебаний средней скорости горения (см. рис. 2).

В рассмотренных вариантах давление на границе области переброски газа всегда больше внешнего $p_{вн}$ и начального давления в пороках p_0 . Из этого, в частности, следует, что скорость горения, по-видимому не должна зависеть от величины p_0 ($p_0 \leq p_{вн}$). Изменения могут

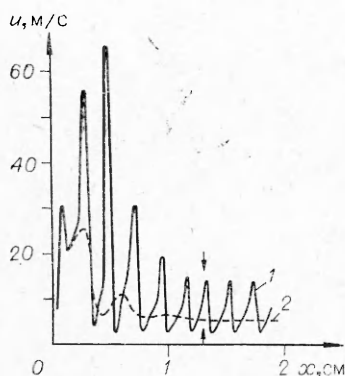


Рис. 2. Скорость распространения конвективного горения по длине образца ($p=100$ ат, $T=2800$ К, $T_n=300$ К, $\rho_n=1$ ат, $E=20$ ккал/моль, $k_0=10^{12}$ см/с, $m=0,2$).

1 — при периодическом сбросе всего каркаса (5 слоев); 2 — при слоистом диспергировании.

друга, будут поочередно вести процесс горения.

В таблице в качестве примера приведены расчетные значения ряда параметров для двух указанных вариантов. Некоторые из них (например, скорость выгорания зерен к-фазы и температура поверхности к-фазы) отличаются от тех, которые обычны при горении реальных систем. Однако это есть следствие подбора кинетических параметров (E , k_0), который, не мешая общности рассмотрения динамики самого процесса, позволил резко ускорить расчет.

Рассмотрим возможности стабилизации конвективного горения. Метод стабилизации горения непрерывным повышением давления в зоне горения в постановке работы [6] можно считать обоснованным только для систем с насыпной плотностью. Но и для них стационарный режим конвективного горения при постоянном росте давления в принципе будет сохраняться лишь в течение конечного времени, так как конвективное горение неизбежно должно перейти в конвективно-волновое. В прочных системах диспергирование вызовет пульсации скорости воспламенения. Механизм стабилизации, использующий модель двойной пористости, для систем с насыпной плотностью применить нельзя.

В прессованных системах неоднородность пористости, по-видимому, может существенно повлиять на динамику процессов в зонах конвективного горения и расширить возможности стабилизации по механизму дискретного диспергирования. В частности, можно предположить, что эффект двойной пористости способен предотвратить затухание горения в режиме с чередованием ведущего давления.

Таким образом, истинно стационарный режим конвективного горения для систем с диспергированием к-фазы оказывается невозможным. Стабилизирующий эффект диспергирования проявляется в том, что конвективное горение протекает в пульсирующем режиме с постоянной средней скоростью. Причем это возможно только при постоянстве внешнего давления и дискретном характере диспергирования при условии, что после диспергирования время релаксации газовой выделенной в зоне горения не превышает времени выравнивания давления в порах к-фазы до уровня внешнего (иначе говоря, внешнее давление не должно быть выше давления на границе области переброски газа). При реализации этих условий в эксперименте, если базы измерения намного превышают размер диспергируемых частиц, можно получить посто-

происходить лишь на участке формирования зон конвективного горения и в зоне III. Отток газа из пор возможен только в области, где давление превышает внешнее. Поэтому если характеристики пористой системы и внешние условия таковы, что на границе переброски газа давление меньше внешнего, то отток никогда не сможет компенсировать накопление газа. В этом случае при постоянстве внешних условий стабилизация конвективного горения по механизму дискретного диспергирования невозможна и процесс будет затухающим. При таком режиме горения (рис. 3) время выравнивания давления в порах до одного уровня с внешним меньше времени восстановления максимального уровня газовой выделенной после диспергирования. Поэтому после выравнивания давлений ведущим на некоторое время становится внешнее давление (см. рис. 3, в). В итоге давление в зоне горения и внешнее, сменяя друг

янную среднюю скорость распространения конвективного горения практически на любой длине заряда.

Из сказанного также следует, что независимо от характера диспергирования к-фазы и стабилизации конвективного горения можно также добиться периодическим изменением давления во внешнем объеме, т. е. в зоне догорания взвеси. Это показали и эксперименты по горению пористых систем в легкоразрушающихся оболочках [4], а также опыты¹, в которых дымный порох сжигался в слое песка или хлорвиниловой трубке (общая длина до пяти метров). Пульсирующее горение сопровождалось периодическим разбрасыванием песка или разрывами оболочки. Интервал пульсаций составлял 20÷25 см, средняя по длине образца скорость горения ~ 40 см/с. В этих экспериментах периодический сброс давления в результате разрыва оболочки по своему воздействию на зоны конвективного горения является аналогом колебаний внешнего давления и давления в зоне горения прочных систем при дискретном характере диспергирования. Изменение частоты, формы, амплитуды колебаний внешнего давления, по-видимому, может служить реальным методом регулирования скорости конвективного горения.

ВЫВОДЫ

1. Дискретное диспергирование в отличие от непрерывного, характерного для систем с насыпной плотностью, может вызывать релаксационные процессы не только в зоне горения, но и за ее пределами. Причина их возникновения состоит в разрушении части зоны горения с максимальным газовыделением.

2. Рассмотрены условия и механизм влияния дискретного диспергирования на конвективное горение пористых систем. Указывается, что

а) с учетом дискретного диспергирования, по-видимому, невозможна реализация истинно стационарного режима горения;

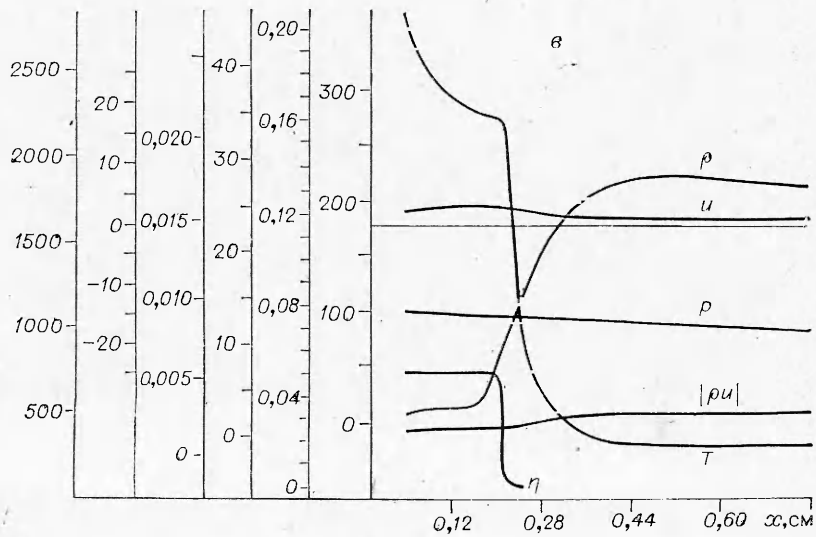
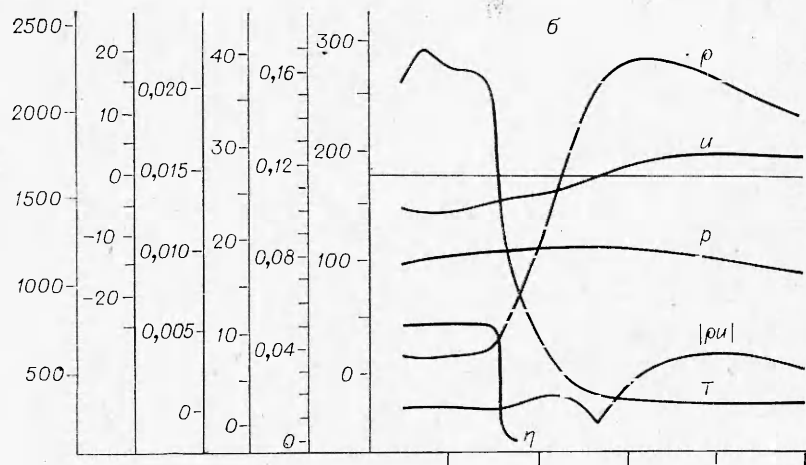
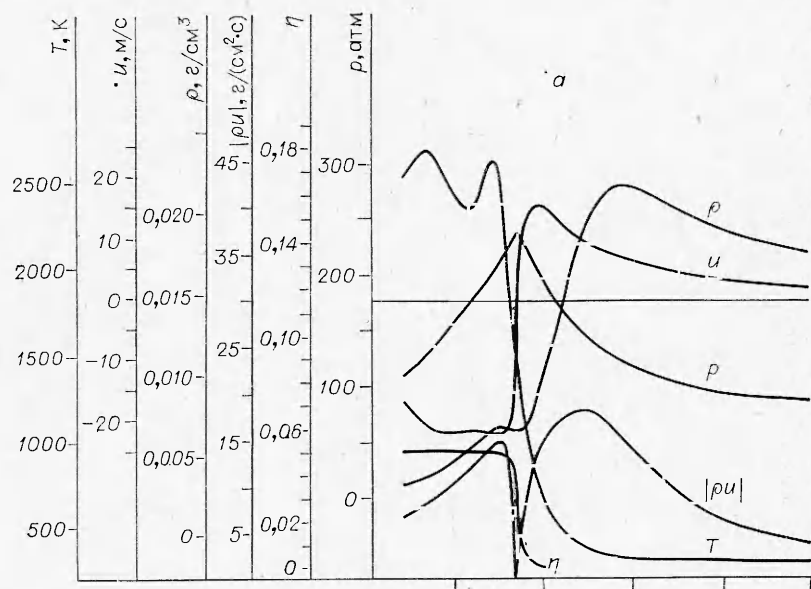
б) если давление на границе зоны переброски меньше внешнего, то не имеет места стабилизация конвективного горения по механизму дискретного диспергирования.

3. Отмечена возможность реализации режимов конвективного горения, определяемых как давлением в порах вещества, так и внешним.

¹ Одновременно аналогичные опыты проведены А. И. Коротковым и В. А. Фатеенковым (ИХФ АН СССР).

Кинетические параметры	Средняя скорость конвективного горения, см/с	Скорость выгорания зерен к-фазы, мм/с	Нагрев газа за счет сжигания, град	Время периодического накопления газа, с	Температура		
					поверхности к-фазы, °С	центра частиц, °С	газа, К
$E=20$ ккал/моль, $k_0=10^{12}$ см/с	695	3,5	13,5	1,56·10 ⁻⁶ (~27% от периода) Постоянное накопление	40; 130*	33,5; 55*	700; 2370*
$E=30$ ккал/моль, $k_0=10^{14}$ см/с	~70	0,7	2,2		120; 220*	81,5; 160*	1070; 2310*

* Первые цифры соответствуют моменту начала газификации, вторые — моменту диспергирования.



4. Показана возможность стабилизации конвективного горения пористой системы периодическим изменением давления в зоне догорания (внешнего давления).

Поступила в редакцию
19/1 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М., «Наука», 1968.
2. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М., «Наука», 1973.
3. К. Кио. М. Summerfield. AIAA J., 1974, 12, 1.
4. В. Ф. Дубовицкий, В. Г. Коростелев и др. ФГВ, 1974, 10, 6.
5. Б. С. Ермолаев, А. А. Борисов, Б. А. Хасаинов. AIAA J., 1975, 13, 8.
6. Б. С. Ермолаев, Б. А. Хасаинов и др. ФГВ, 1975, 11, 5.
7. Б. С. Ермолаев, Б. А. Хасаинов и др. ФГВ, 1977, 13, 2.
8. В. К. Боболев, И. А. Карпунин, С. В. Чуйко. НТПГВ, 1965, 1, 1.
9. К. Кио, М. Summerfield. Princeton Univ., Preprint, 1974.
10. Б. С. Ермолаев, А. А. Сулимов и др.— В сб.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем. Черноголовка, 1977.
11. В. Г. Коростелев, Ю. В. Фролов.— В сб.: Кинетика физико-химических реакций. Черноголовка, 1977.

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСЕЙ ПОРОШКОВ МАГНИЯ И ЦИРКОНИЯ

Г. К. Ежовский, Е. С. Озеров, Ю. В. Рощеня

(Ленинград)

Изучение воспламенения порошкообразных металлов представляет интерес в связи с применением их в качестве горючего и в связи с проблемой обеспечения безопасных условий при их производстве, транспортировке и хранении. В настоящей работе приводятся результаты экспериментального и расчетного исследования процессов самовоспламенения газовзвесей порошкообразного магния и циркония в воздухе.

Экспериментальное исследование

Исследование самовоспламенения газовзвесей порошков металлов проводилось на установке, схема которой представлена на рис. 1 (установка аналогична использованной в [1]). Газовзвесь формировалась импульсным пневматическим распылом навески порошка в равномерно прогретую зону горизонтально расположенной цилиндрической печи 4 с внутренним диаметром канала 40 мм. Навеска порош-

- Рис. 3. Распределение параметров (см. рис. 1) в зонах конвективного горения, когда давление на границе области переброски газа меньше внешнего ($p = 100$ ат, $T = 2800$ К, $m = 0,2$, $E = 30$ ккал/моль, $k_0 = 10^{14}$ см/с, $p_n = 1$ ат, $T_n = 300$ К).
- а) перед диспергированием к-фазы; б) в момент выравнивания давления в порах и внешнего; в) при $p > p_{пор}$.