

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ФОРМЫ СУЩЕСТВОВАНИЯ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ

В. В. Алёшин, Ю. М. Михайлов

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, vva@icp.ac.ru

Изучено влияние содержания горючих частиц на пространственные формы существования волны горения в модельной системе «безгазовый термит — инертный материал». Показано, что нижний концентрационный предел горения этой смеси связан с образованием трехмерного связывающего перколяционного кластера или с перколяционным фазовым переходом. Вблизи нижнего концентрационного предела горение модельных смесей проходит в режиме тления, когда отдельные очаги горения хаотично перемещаются по объему несгоревшего материала. При содержании термитных частиц в исходном составе выше 47 % формируется неподвижная прогретая поверхность, по которой передвигаются отдельные раскаленные очаги горения. Перемещение этой поверхности по несгоревшему материалу происходит только локально в результате продвижения по ней очагов горения. Образованию такой единой прогретой поверхности соответствует возникновение второго перколяционного фазового перехода. При объемном содержании частиц термита в исходной смеси выше 70 % отдельные очаги горения сливаются в единую поверхность послойного горения вследствие формирования третьего перколяционного фазового перехода.

Ключевые слова: гетерогенные системы, волна горения, форма, перколяция.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что горение некоторых энергетических гетерогенных систем в нестационарном режиме сопровождается значительными динамическими искажениями формы волны горения. Такие явления часто встречаются в таких процессах, как самораспространяющийся высокотемпературный синтез [1], формирование высокопористых композиционных материалов в низкотемпературной волне горения энергетических материалов [2] или горение нитрата целлюлозы при низких давлениях [3].

В последнее время развиваются новые подходы к описанию процессов горения таких систем с учетом дискретности исходной гетерогенной среды и распространяющейся в ней волны горения [4–9]. С одной стороны, исследования такого рода процессов опираются на представления об определяющем влиянии хаотичной внутренней структуры исходного образца на распространение волны горения в данной системе и ее основные параметры. При этом главное значение придается зависимости существования волны горения и основных ее параметров от объемного содержания исходных реагентов, координационного числа (чис-

ла контактов) отдельных частиц этих компонентов и конкретной структуры исследуемой смеси. Показана связь нижнего концентрационного предела горения таких гетерогенных систем с возможностью возникновения перколяционного фазового перехода, сопровождаемого образованием непрерывного кластера из горючих частиц [4–6].

С другой стороны, большое внимание уделяется регистрации и статистической обработке текущих локальных скоростей продвижения волны горения в различных энергетических материалах на основе скоростной видеосъемки. Обнаружено, что при эстафетном распространении волны горения процесс протекает в две стадии — медленный прогрев реакционной ячейки и значительно более быстрое ее сгорание. В результате анализа полученных данных показано, что в зависимости от природы, дисперсности и соотношения исходных компонентов возможны различные пространственные формы существования волны горения: квазигомогенное, многоочаговое, хаотичное, турбулентное, мерцающее или в виде так называемых поперечных волн [7–9].

Поскольку существующие в настоящее время экспериментальные методы не позволяют непосредственно проследить влияние внутренней структуры гетерогенных систем на пространственное строение и динамику волны го-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-03-33133а).

рения, делаются попытки численного моделирования таких процессов в двумерном [6, 10] или трехмерном приближении [11, 12]. В результате моделирования процесса эстафетного распространения волны горения в гетерогенных системах методом клеточных автоматов показано, что форма волны горения в таких смесях зависит от объемного содержания горючих частиц в исходной смеси [6, 12]. Рассмотрена также роль теплопередачи в процессе эстафетного распространения горения через перколяционные кластеры горючих частиц в хаотичных и регулярных двумерных гетерогенных системах [6, 10].

Цель настоящей работы — исследование связи различных пространственных форм волны горения с объемным содержанием активных горючих частиц в гетерогенной смеси на примере горения реальной модельной системы «безгазовый термит — инертный материал».

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изготовления исходных модельных смесей использовали диоксид марганца и перманганат калия марки «чда», железо карбонильное марки «осч» с размером частиц ≈ 40 мкм и диоксид кремния в виде белой сажи марки БС-100. Диоксид марганца и перманганат калия предварительно измельчали и просеивали, отбирая фракцию частиц $40 \div 70$ мкм.

Выбор природы и соотношения компонентов термитного состава обусловлен необходимостью обеспечить низкую температуру его зажигания, способность гореть его отдельных гранул в массе образца и развиваться при горении не слишком высокую температуру, чтобы избежать плавления и диссоциации продуктов реакции. Для минимизации потерь тепла из реакционной зоны в качестве инертного наполнителя были выбраны гранулы прессованной белой сажи, обладающие высокой пористостью и невысокой теплопроводностью.

Термитный состав готовили, перемешивая в шаровой мельнице 36.4 % перманганата калия, 36.4 % диоксида марганца и 27.3 % железа карбонильного. Из составленной термитной смеси и белой сажи по отдельности изготавливали цилиндрические блоки диаметром 30 мм методом глухого прессования под давлением 150 МПа. Плотность блоков термита составляла ≈ 2.6 г/см³, плотность белой сажи ≈ 0.9 г/см³. Затем блоки термита и белой сажи

по отдельности дробили и отсеивали гранулы термитного и инертного материалов размером $0.5 \div 1.0$ мм.

Опытные образцы прессовали из смеси гранул термита и белой сажи в необходимом объемном соотношении в прямоугольной форме бокового прессования под давлением 100 МПа. Изготовленные блоки имели форму параллелепипеда размером $15 \times 15 \times 75$ или $15 \times 25 \times 75$ мм. В один из торцов блока запрессовывали поджигающую таблетку из термитной смеси диаметром 10 мм и массой ≈ 0.3 г.

Горение составов инициировали поджигом зажигающей таблетки нихромовой спиралью накаливания. Изображение боковой поверхности горящего образца снимали на 35-миллиметровую цветную пленку «Kodak» чувствительностью 400 ед. фотоаппаратом «Praktika» с насадочными кольцами. Движущийся фронт горения образца удерживался в поле зрения соответствующим параллельным смещением фотокамеры с помощью специального штатива. Время горения фиксировали с момента поджига блока до момента окончания его горения с точностью ± 0.2 с. За время горения одного образца удавалось сделать $10 \div 12$ фотоснимков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В нормальных условиях исследуемая модельная система «термит — инертный материал» способна устойчиво гореть, не затухая при объемном содержании гранул термита не менее 42.3 %. На нижнем концентрационном пределе (таблица, состав 2) волна горения формировалась в виде отдельных раскаленных желтых очагов диаметром $\approx 2 \div 3$ мм (рис. 1). Они хаотично продвигались по массе исходного материала независимо друг от друга, время от времени выходя на боковую поверхность образца. Внешне это выглядело как внезапное появление светящегося очага на некотором расстоянии от остывающего красного следа от выхода предыдущего очага на боковую поверхность образца. Изредка выход горящего очага на боковую поверхность происходил ближе к месту поджига, чем след от предыдущего очага. При этом отдельные области исходной смеси могли оставаться непрогоревшими. Наиболее близкий геометрический аналог такой формы распространения волны горения в исследуемой смеси — это горение некоторых материалов в режиме тления.

Зависимость параметров горения смесей термитного и инертного материалов от соотношения исходных компонентов

Параметр	Состав							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Содержание термита, %: массовое	67.34	71.67	73.21	74.21	79.10	81.25	88.24	90.91
объемное	39.34	42.35	47.16	48.70	52.58	54.59	70.74	74.92
Содержание инертного материала, %: массовое	32.66	28.29	27.20	24.74	20.99	18.84	11.84	9.17
объемное	54.57	48.78	51.53	46.44	41.54	36.92	27.00	1.49
Межгранулярная пористость, %	6.09	8.87	1.31	4.86	5.88	8.49	2.26	3.59
Плотность, г/см ³	1.55	1.55	1.61	1.75	1.74	1.76	2.07	2.12
Скорость горения, мм/с	Не горит	0.52	0.95	1.17	1.24	1.31	1.41	1.77

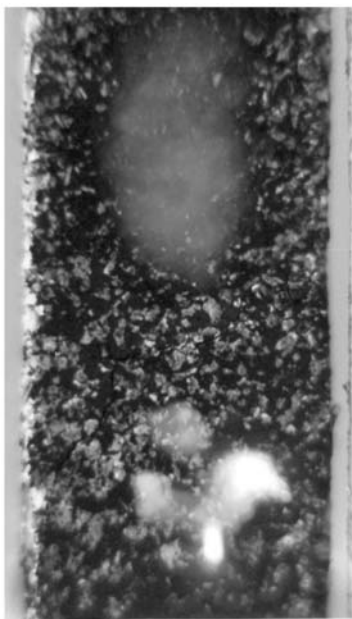


Рис. 1. Горение состава 2 в режиме тления (ширина образца 15 мм)

Анализируя полученные двумерные изображения и экстраполируя их в трехмерное пространство, можно сделать вывод, что в данном случае волна горения распространяется внутри образца в виде отдельных очагов по ветвям соединяющего перколяционного кластера из частиц термитного материала. Такого объемного содержания термита в данных условиях достаточно для формирования соединяющего кластера и возникновения так называемого перколяционного фазового перехода [5, 6]. Однако это минимальное объемное содер-

жание частиц термита значительно превышает известное значение предела Шера — Заллена для образования соединяющего кластера в трехмерных хаотичных смесях ($K \approx 15.9\%$ [13, 14]). По-видимому, в данной системе критический диаметр горения термитного состава в окружении инертного материала заметно превышает размер его отдельных частиц. По этой причине эстафетное распространение очагов горения в образце может происходить не через отдельные частицы термита, а только через агломераты этих частиц. Ранее с помощью компьютерного моделирования было показано [12], что в широком интервале объемного содержания активных частиц очаги горения в гетерогенных системах могут состоять всего из 2 ÷ 3 таких частиц. Это согласуется с отношением размеров исходных частиц термита (0.5 ÷ 1.0 мм) и средних размеров очагов горения в изучаемой системе (2 ÷ 3 мм). Соответственно для обеспечения требуемого поперечного сечения ветвей соединяющего перколяционного кластера необходимо более высокое объемное содержание частиц термита по сравнению с известной критической величиной.

С увеличением содержания термита в исходной смеси уменьшается время полного сгорания образца, причем это происходит не за счет ускорения движения очагов горения, а вследствие роста их количества. При объемном содержании частиц термита около $\approx 47\%$ (таблица, состав 3) резко изменяются внешние характеристики процесса горения. Происходит формирование единой поверхности, отделяющей нагретые докрасна продукты реакции от исходной смеси, вдоль которой хаотично перемещаются отдельные ярко-желтые очаги го-

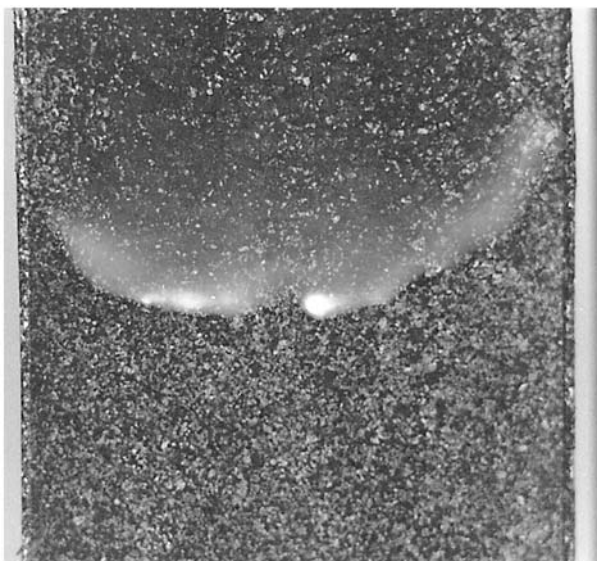


Рис. 2. Движущиеся очаги на неподвижном фронте горения состава 3 (ширина образца 25 мм)

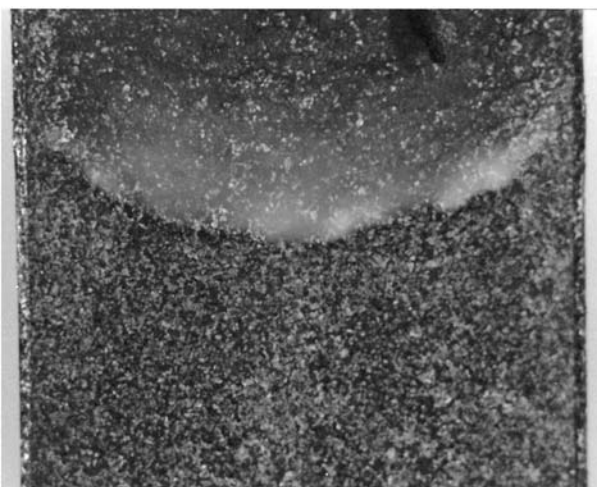


Рис. 3. Неподвижный фронт горения состава 3 (ширина образца 25 мм)

рения (рис. 2). Локальное продвижение этой поверхности в осевом направлении на $1 \div 2$ мм имеет место только в зоне продвижения одного из раскаленных очагов горения. На следующей фотографии (рис. 3) зафиксирован момент, когда эта неподвижная нагретая поверхность проявляется на боковой поверхности образца, но на ней в данный момент нет ни одного движущегося очага горения. Поскольку эта поверхность резко отличается по своей приро-

де от поверхности послойного горения, условно назовем ее «фронтом прогрева». На качественном уровне данное явление имеет некоторое сходство с зоной прогрева [8] или с так называемыми поперечными волнами горения [9]. Следует отметить, что если температура, развиваемая в очаге горения (1360 К), близка к адиабатической для термитного состава, то температура «фронта прогрева» гораздо ниже и близка к адиабатической для смеси термитного и инертного материалов (890 К).

Образование «фронта прогрева», по видимому, связано с новым перколяционным фазовым переходом. При достижении определенного объемного содержания термита происходит объединение зон прогрева вокруг раскаленных очагов горения и формируется единая поверхность «фронта прогрева». Это значение критического объемного содержания термита больше необходимого для первого фазового перколяционного перехода, так как значение предела Шера — Заллена для плоских систем ($K = 59\%$) существенно больше, чем для трехмерных.

Так как сформировавшийся «фронт прогрева» перемещается только локально, он не имеет постоянной формы. Непрерывно происходит попеременное отставание одной из его боковых сторон, более заметное в угловых частях горящего образца. Отставшие зоны медленно прогреваются со стороны боковых, уже прогоревших частей блока и затем быстро сгорают, временно выравнивая фронт горения. В этих случаях временное локальное ускорение процесса горения достигается не за счет увеличения численности очагов горения, а за счет роста скорости их продвижения по прогретому материалу. Это указывает на существование зависимости скорости поперечного движения очагов горения от локальной температуры прогрева исходной смеси во «фронте прогрева».

Дальнейшее увеличение содержания термита в исходной смеси приводит к такому росту количества отдельных очагов горения, что между ними возникает конкуренция за исходный материал (таблица, состав 5). Каждый очаг занимает свою часть поверхности «фронта прогрева», что приводит к формированию своеобразной ячеистой структуры (рис. 4). Поскольку хаотично перемещающиеся в поперечном направлении очаги горения чаще бывают в центре своей ячейки, каждый из них фор-

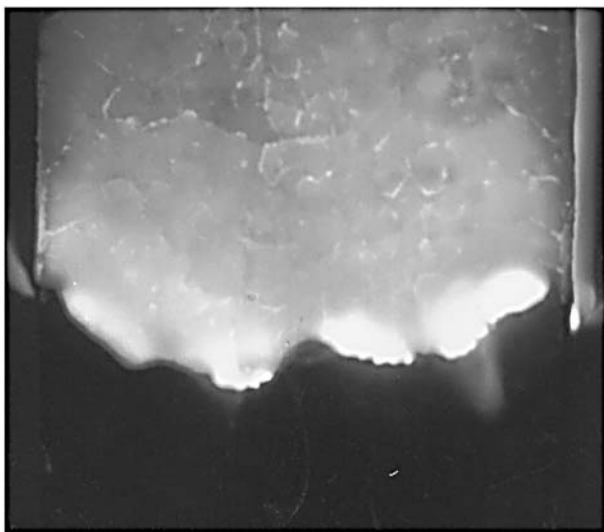


Рис. 4. Ячеистая структура фронта горения состава 5 (ширина образца 25 мм)

мирует свою лунку с несколько отстающими краями. Увеличение содержания термита в исходной смеси приводит к росту температуры «фронта прогрева», что в свою очередь ускоряет перемещение очагов горения в пределах своих лунок. Внешне это похоже на вихревое [12], хаотичное или мерцающее [7] горение некоторых гетерогенных составов.

Если объемное содержание гранул термита больше 70 % (таблица, составы 7, 8), происходит новый, уже третий по счету перколяционный фазовый переход. Большинство от-



Рис. 5. Горение состава 8 в послойном режиме (ширина образца 25 мм)

дельных очагов горения сливаются вместе и формируют единую раскаленную поверхность горения (рис. 5), перемещающуюся преимущественно в осевом направлении. Именно такой режим в наибольшей степени соответствует определению «равномерное, послойное горение».

Полученные результаты могут быть использованы для объяснения причин локальных флуктуаций температуры и скорости горения энергетических материалов [15] и не совсем обычного вида зависимостей параметров низкотемпературного горения балластированных энергетических систем [16].

ВЫВОДЫ

Нижний концентрационный предел горения смеси «безгазовый термит — инертный наполнитель» связан с первым перколяционным фазовым переходом — образованием трехмерного связывающего перколяционного кластера из горючих частиц.

При малом объемном содержании термитного материала в исходной смеси ее горение происходит в канальном режиме. При этом зона горения формируется в виде отдельных независимых очагов размером $\approx 2 \div 3$ мм, хаотично распространяющихся по объему исходной смеси.

Увеличение объемного содержания частиц термита в исследуемой смеси выше 47 % приводит к формированию сплошного «фронта прогрева», вдоль которого перемещаются отдельные очаги горения, каждый в пределах своей зоны воздействия. Этому объемному содержанию термитного материала в исходной смеси соответствует второй перколяционный фазовый переход, связанный с пространственным объединением зон прогрева отдельных очагов горения.

При объемном содержании частиц термита в исходной смеси свыше 70 % происходит объединение отдельных очагов горения в единую поверхность послойного горения, чему соответствует третий перколяционный фазовый переход.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г. Твердопламенное горение. Черногловка: ИСМАН, 2000. С. 108.
2. Михайлов Ю. М., Леонова В. Н. Низкотемпературные волновые режимы горения энерге-

- тических систем, разбавленных инертными наполнителями, и их использование для получения полимерных композитов // Докл. АН. 2002. Т. 386, № 1. С. 61–64.
3. **Маршаков В. Н., Истратов А. Г., Пучков В. М.** Неоднородный фронт горения составов на основе нитроклетчатки и нитроглицерина // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 4. С. 100–106.
 4. **Фролов Ю. В., Никольский Б. Е.** Пространственная структура и концентрационные пределы горения малогазовых систем // Докл. АН СССР. 1989. Т. 305, № 2. С. 386–390.
 5. **Фролов Ю. В., Пивкина А. Н., Алешин В. В.** Перколяционные явления при горении гетерогенных конденсированных систем // Хим. физика. 1997. Т. 16, № 9. С. 73–84.
 6. **Гринчук П. С., Рабинович О. С.** Перколяционный фазовый переход при горении гетерогенных смесей // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 4. С. 41–53.
 7. **Кочетов Н. А., Рогачев А. С.** О причинах тепловой микрогетерогенности волны СВС // Докл. РАН. 2003. Т. 389, № 1. С. 65–67.
 8. **Рогачев А. С., Кочетов Н. А., Курбаткина В. В., Левашов Е. А., Гринчук П. С., Рабинович О. С., Сачкова Н. В., Бернар Ф.** Микроструктурные аспекты безгазового горения механически активированных смесей. I. Высокоскоростная микровидеосъемка состава Ni + Al // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42, № 4. С. 61–70.
 9. **Маршаков В. Н., Истратов А. Г., Колесников В. И. и др.** Перколяционные явления при горении смесей пороха с углем // Хим. физика. 1996. Т. 15, № 9. С. 143–147.
 10. **Димаки А. В., Шилько Е. В., Псахье С. Г.** О моделировании распространении экзотермической реакции в гетерогенных средах // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 2. С. 38–44.
 11. **Ивлева Т. П., Мержанов А. Г.** Трехмерное моделирование твердопламенного хаоса // Докл. РАН. 2001. Т. 381, № 2. С. 210–213.
 12. **Алешин В. В., Пивкина А. Н., Фролов Ю. В.** Динамика распространения процесса горения в гетерогенных конденсированных смесях: Компьютерное моделирование // Хим. физика. 2002. Т. 14, № 11. С. 106–109.
 13. **Scher H., Zallen R.** Critical density in percolation processes // J. Chem. Phys. 1970. V. 53, N 12. P. 3759–3761.
 14. **Ключарев В. В.** Константы Шера — Заллена // Пятое междунар. совещание «Фундаментальные проблемы ионки твердого тела»: Материалы докл. Черноголовка: ИПХФ РАН, 2000. С. 119–125.
 15. **Рогачев А. С.** О микрогетерогенном механизме безгазового горения // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 2. С. 38–47.
 16. **Михайлов Ю. М., Алешин В. В., Леонова В. Н.** Низкотемпературное горение энергетических материалов в наполненных полимерных системах // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 3. С. 98–102.

Поступила в редакцию 12/VIII 2007 г.