

ФІЗИКА ГОРІННЯ

УДК 536.46

Шевчук В.Г.¹, Полетаев Н. И.¹, Агеев Н. Д.¹, Киро С. А.²

¹Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова, г. Одесса

²Физико-химический институт защиты окружающей среды и человека, г. Одесса

E-mail: incomb@ukr.net

Синергетические аспекты волнового горения пылей

Экспериментально изучены процессы самоорганизации горения микродисперсных частиц металлов, взвешенных в кислородсодержащих средах. Наблюдалось изменение структуры фронта горения пылевого пламени при изменении управляющих характеристик процесса, задаваемых физико-химическими характеристиками газозвеси и гидродинамическими условиями организации горения. Опыты проводились в полузакрытых трубах при зажигании газозвесей частиц Al, Mg, Zr у открытого и закрытого конца трубы, а также в условиях предварительно перемешанного пламени горючего и окислителя на пылевых горелках. Показано, что самоорганизация волнового горения газозвеси в трубах приводит к появлению каскада переходных режимов горения, зависящих от места поджога и характеристик пыли. При поджоге газозвеси у открытого конца трубы наблюдались переходы от ламинарного пламени, к двум типам вибрационного пламени, имеющих разную физическую природу, и к развитому турбулентному горению. Еще более сложный каскад структурных изменений пламени наблюдался в случае зажигания взвеси с закрытого конца трубы. В этом случае в газозвесах магния, алюминия и алюмомагниевого сплава различной дисперсности и концентрации наблюдался каскад переходов от ламинарного пламени к турбулентному, затем к пульсирующему пламени, переходящему в быстрое «языковое» горение. Каскадная смена режимов горения пыли в этих условиях сопровождалась увеличением скорости пламени от 2 до 300 м/с. Установлено, что наличие этих стадий и скорости пламени определяется физико-химическими параметрами смеси. Приведены результаты качественных исследований структуры ламинарного пламени частиц Al, Zr, Ti, Fe на пылевой горелке. Впервые наблюдалось существование при определенных условиях обращенного самоподдерживающегося пламени в пыли мелкодисперсного железа. Предположительно, такая необычная структура фронта горения пылевого пламени обусловлена кинетическим режимом горения частиц железа, для которого характерна экстремальная (с максимумом) зависимость скорости пламени от концентрации горючего.

Ключевые слова: самоорганизация процессов горения, горение металлов, скорость пламени, структура фронта пламени, переходные режимы.

Введение. Одним из центральных направлений в синергетике является изучение режимов с обострением в неравновесной системе, т.е. сверхбыстрого развития процесса, когда характерные параметры (температура, энергия, концентрация) неограниченно возрастают за конечное время обострения [1]. В основе механизма такого развития лежит нелинейная положительная обратная связь. Основная используемая модель, претендующая на объяснение процессов самоорганизации, образования структур и их сверхбыстрого развития, – это ма-

тематические закономерности процессов горения и теплопроводности (диффузии) в открытых нелинейных средах. На активной горючей среде (с нелинейными источниками энергии), несмотря на наличие диссипативных, рассеивающих неоднородности, факторов (теплопроводности, диффузии, дисперсии, гидродинамики и т.д.), возникают и самоподдерживаются очаги горения, метастабильные структуры горения. Эта модель представляет собой одну из наиболее простых, но глубоко содержательных на современном этапе моделирования процессов самоорганизации [2]. Поэтому, синергетика, как наука о самоорганизации в неравновесных открытых системах во многом базируется на подходах, развитых в физике горения. Действительно горючие и детонирующие среды являются типичным примером активных систем, то есть систем с распределенными нелинейными источниками тепла и массы и потоковой (диффузионной) связью между элементами системы. Волновое горение газовзвесей твердого горючего дает множество примеров образования и перестройки структуры фронта пламени при изменении управляющих параметров, задаваемых физико-химическими параметрами горючей смеси и гидродинамическими условиями организации горения.

Целью настоящей работы является выявление и анализ основных механизмов, определяющих процессы самоорганизации при волновом горении газовзвесей металлических частиц в зависимости от физико-химических характеристиках газовзвеси и гидродинамических условий организации горения.

Экспериментальные результаты и их анализ. Так в случае распространения пламени у открытого конца трубы [3] в полуоткрытых трубах ($L=1$ м) при зажигании пыли (Al , Mg , Zr , $Al+Zr$, $Al+Fe$, $Al+B$) процесс носит нестационарный характер, который можно интерпретировать, как следующий каскад переходов (рис. 1): ламинарное пламя с поверхностью фронта пламени, представляющий собой параболоид вращения, обращенный вершиной в исходную смесь, и постоянной скоростью (а) \rightarrow вибрационные пламя первого типа с такой же поверхностью и продольными колебаниями фронта с частотой, равной первому акустическому резонансу столба горючей взвеси (на длине трубы ук-

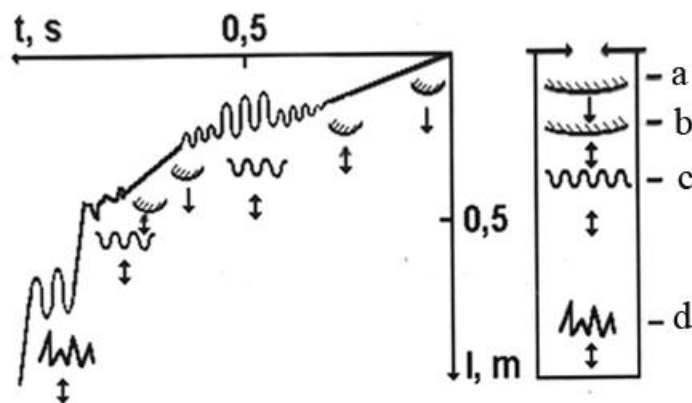


Рис. 1. Типичный каскад переходов при развитии вибрационного горения в полуоткрытых трубах при зажигании у открытого конца трубы. $L = 1$ м, $D = 0.056$ м. Алюминий АСД-4, концентрация $B_c = 380$ мг/м³

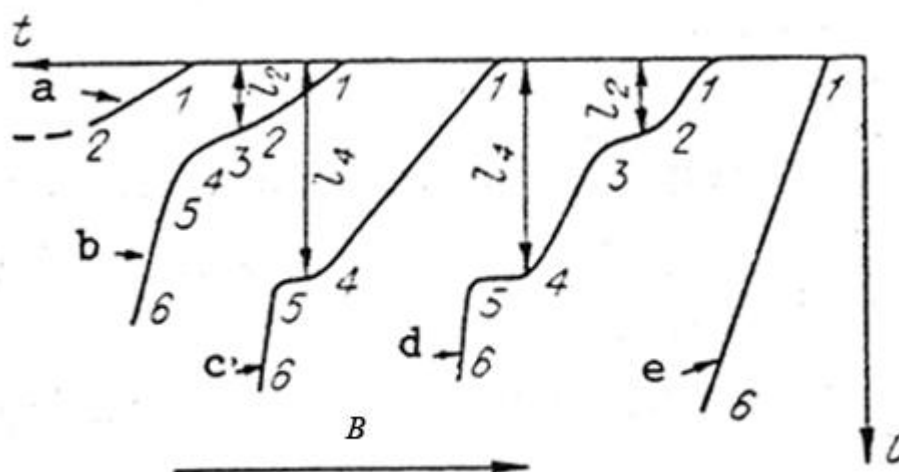


Рис. 2. Типы переходов при распространении пламени. В полузакрытых трубах концентрация увеличивается слева направо: а) продольные колебания с сохранением формы фронта (вибрационное горение I типа); б, с – изменение поверхности фронта в начальной стадии перехода к вибрационному горению II типа

ладывается четверть длины акустической волны), обусловленное модуляцией распространяющегося фронта акустическим течением в стоячей волне (b) → вибрационное пламя второго типа с волнообразованием на поверхности, являющимся результатом Тейлоровской неустойчивости раздела границы двух сред с различной плотностью (исходная смесь – продукты сгорания) под действием периодических колебаний, обусловленных вибрационным горением первого типа (c) → турбулентное пламя, как результат развития трубной турбулентности (d).

В зависимости от характеристик пыли возможен и обратный переход от колебаний второго типа к первому, затем к ламинарному пламени с последующим переходом к первому, который заканчивается развитием турбулентного пламени. Различные каскады переходов иллюстрирует рис. 2, представляющий собой зависимость продольной координаты фронта пламени от времени (показаны усредненные зависимости $l(t)$ без учета колебаний). Форма поверхности пламени в установившихся режимах приведена на рис. 3.

Еще более сложный каскад структурных изменений пламени имеет место в случае зажигания взвеси с закрытого конца трубы ($L=3$ м), когда фронт пламени находится под возмущающим воздействием распространяющихся продуктов сгорания [4]. В этом случае типичный процесс распространения пламени в пылях магния, алюминия и алюмомагниевого сплава различной дисперсности и концентрации представим в виде следующего каскада переходов (рис. 4а): ламинарное пламя с видимой скоростью порядка 2-6 м/с → турбулентное пламя со скоростями порядка 20-30 м/с, как результат развития трубной турбулентности (смыкание турбулентных пограничных слоев происходит на расстоянии порядка 15 диаметров трубы) → пульсирующее пламя, как результат развития нелинейных акустических колебаний (частота колебаний равна половине первого

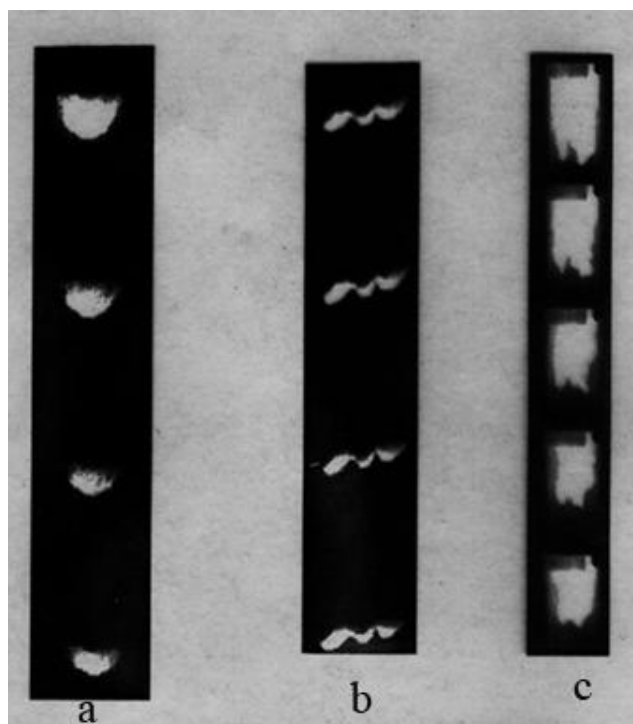


Рис. 3. Форма поверхности установившегося фронта пламени: а – ламинарное и вибрационное I типа пламя, б – вибрационное пламя II типа, с – турбулентное пламя.

акустического резонанса) → быстрое языковое горение со скоростями порядка 300 м/с, при котором пламя приобретает форму острого длинного языка, обращенного вершиной в исходную смесь (рис. 4б), как результат не скомпенсированного движущего перепада давления во фронте пламени трением исходной смеси о стенки трубы. Наличие этих стадий и скорости пламени определяются физико-химическими параметрами смеси.

На рис. 4а развитию нелинейных акустических колебаний соответствует индекс *a* (около 15 калибров). При этом на кривой 2 происходит 3 полных цикла колебаний, на кривых 3-4 шесть полных циклов. На рис 5а приведено более детальное изменение координаты фронта во времени (кривая 1). Усредненному положению фронта соответствует штриховая линия (кривая 2). Колебания давления у закрытого конца трубы в линейном и нелинейном режимах приведены на рис. 5б. Началу стадии развития «языкового» горения на длине 23-28 калибров соответствует индекс *b* на рис. 4б. «Язык» обычно движется по оси трубы и не заполняет все сечение (стенки трубы остаются практически чистыми без следов осаждения продуктов сгорания). Его форма показана на стоп-кадре кинограммы на рис. 4б.

Однако наиболее экзотические изменения структуры пламени наблюдались нами при изучении пылевого предварительно перемешанного факела (Al, Zr, Ti, Fe). Опыты проводились на пылевой горелке, представляющей собой два вертикальных коаксиальных цилиндра. По внутреннему каналу ($D = 1,6$ см) подавалась предварительно перемешанная смесь горючего и газа $O_2 + N_2$. По внешней трубе подавался спутный поток O_2 . Для быстро горящих пылей Al, Zr, Ti во всех случаях формировался фронт пламени, имеющий форму конуса

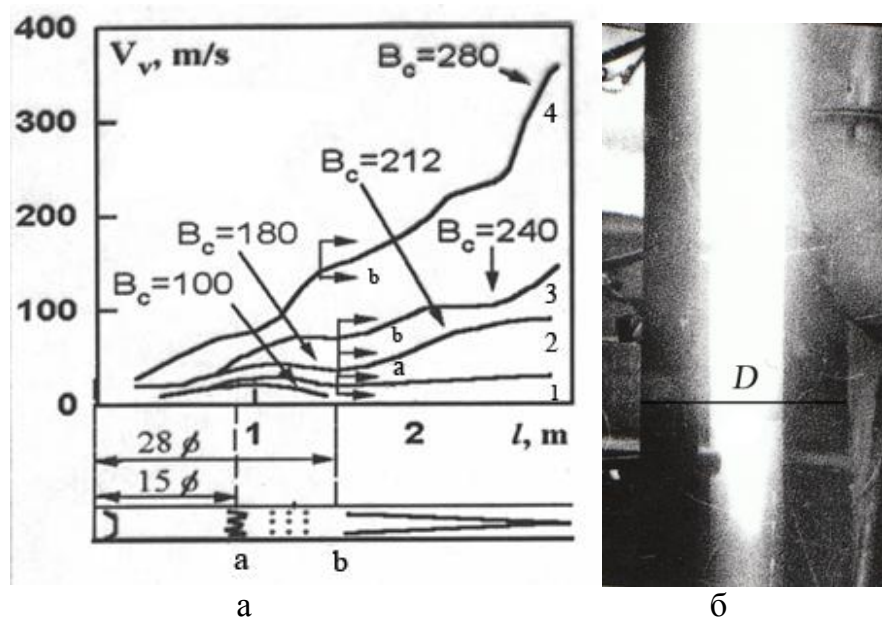


Рис.4. Распространение пламени в полуоткрытых трубах при зажигании у верхнего закрытого конца. Алюмомагниевого сплава ПАМ-4 (средний размер частиц $d_{10} = 14.5$ мкм), $L = 3$ м, $D = 0.056$ м. а) Зависимость скорости пламени по длине трубы; б) фотография «языка» пламени.

(рис.6а). Поток газов подбирались таким образом, чтобы существовал стационарный конус в отсутствие какого-либо дежурного пламени.

Для медленно горящих газозвесей частиц железа в очень узком диапазоне параметров (диаметр частиц равен 4 мкм) концентрация железа $B_c = 400$ г/м³, концентрация кислорода в несущем потоке 70%, фронт пламени обращался в сторону исходной смеси, принимая форму параболоида (рис. 6б). Стабильность обращенного фронта обеспечивалась за счет вихревого кольца, сформированного у основания фронта пламени. Такое изменение структуры фронта имело место только при наличии во внутреннем канале инжекционной трубки, обращенной устьем в направлении исходного течения (при обратном расположении устья эффект отсутствовал), через которую отсасывалась двухфазная смесь с целью получить необходимую концентрацию металла. По всей вероятности, при этом в исходной смеси формировался вогнутый в противоположную сторону потоку профиль концентраций, соответствующий профилю фронта пламени. При этом для обеспечения заданной массовой скорости горения, фронт пламени вытягивался в заданном направлении. Заметим, что в газофазных смесях такой обращенный фронт горения может быть организован только при наличии во фронте в пламени какого-нибудь стабилизатора, например, металлической проволоочки на оси факела [5].

Предположительно, такая необычная структура фронта горения пылевого пламени обусловлена кинетическим режимом горения частиц железа, для газозвесей которого характерна экстремальная (с максимумом) зависимость скорости пламени от концентрации горючего. Частицы быстро горящих металлов выгорают в диффузионном режиме [6]. В этом режиме скорость распространения пламени монотонно увеличивается с увеличением концентрации металла

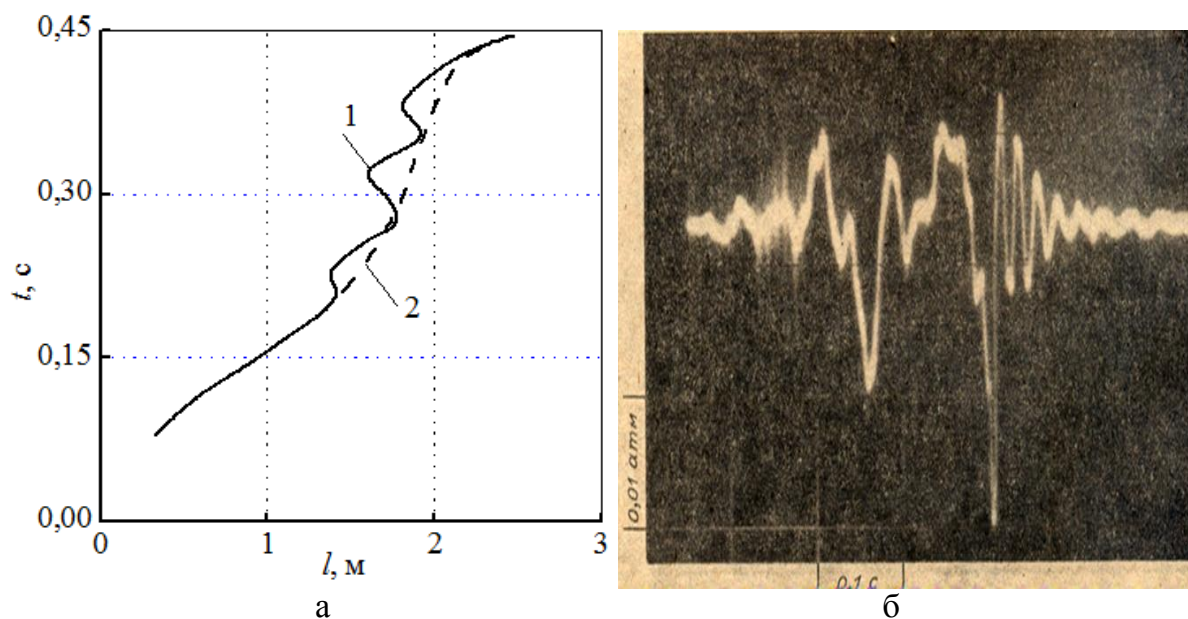


Рис. 5 Колебания координаты фронта пламени (а) и давления (б)

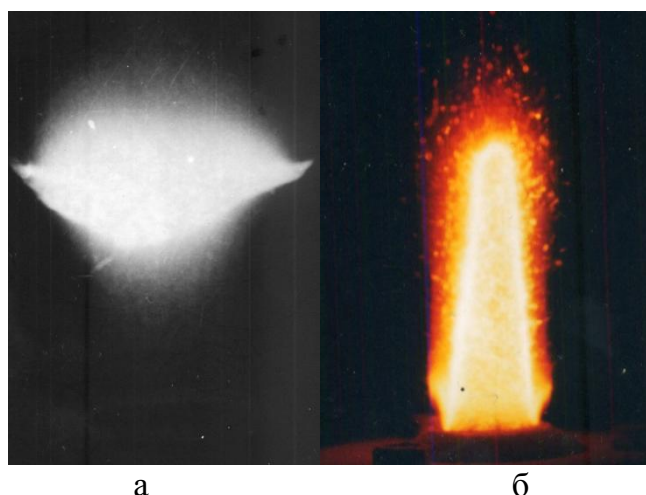


Рис. 6. Обращенный (а) и прямой (б) факел в газозвеси частиц железа

(до определенной концентрации в области богатых горючим смесей) и локальные радиальные распределения концентрации металла не оказывают такого же структурообразующего влияния на фронт пламени, как в случае частиц железа.

Выводы.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования наглядно демонстрируют сложную гидродинамическую ситуацию (в принципе нелинейную) и изменение структуры фронта пламени в переходных процессах волнового горения аэрозвесей металлов при изменении управляющих параметров горючей смеси, задаваемых физико-химическими характеристиками (концентрация, дисперсность и др.) и условиями организации процесса горения. Эти данные, в особенности различные механизмы каскадов пламени, приводящих, в одном случае, к развитой турбулентности пламени, а в другом к «языковому» горению такой же газозвеси, являются примером бифуркационной природы

химически реагирующих газодисперсных систем, являющейся общим признаком их самоорганизации.

Литература:

1. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Основания синергетики. Синергетическое мировидение. – М.: КомКнига, 2005. – 240 с.
2. Курдюмов С.П., Куркина Е.С. Спектр собственных функций автотомельной задачи для нелинейного уравнения теплопроводности с источником // ЖВМиМФ. – 2004. – Т. 44, № 9. – С. 1619.
3. Асланов С. К., Шевчук В. Г. и др. Закономерности вибрационного горения газовзвеси // Физика горения и взрыва. – 1993. – Т.26, № 2. – С.36-43.
4. Шевчук В. Г., Кондратьев Е. Н., Бойчук Л. В., Золотко А. Н. Высокоскоростные режимы горения газовзвеси в полузакрытых трубах // Физика горения и взрыва. – 1986. – Т.22, № 2. – С.40-45.
5. Алексеев М.М. Гидродинамика и структура обращенного опрокинутого пламени. Диссертация кандидата физ.- мат. наук, – 2008, 128 с.
6. Poletaev N.I. Relationship between the dust flame propagation velocity and the combustion mode of fuel particles // Combustion, Explosion and Shock Waves – 2016. – Vol. 52, №. 6. – P. 673–682.

Шевчук В.Г., Полетаєв М. І., Агеев М. Д., Кіро С. А.

Синергетичні аспекти хвильового горіння пилу

АНОТАЦІЯ

Експериментально вивчено процеси самоорганізації горіння мікродисперсних частинок металів, зважених в кисневмісних середовищах. Спостерігалися зміни структури фронту горіння пилового полум'я при зміні керуючих параметрів процесу, що задаються фізико-хімічними характеристиками газосуспензії і гідродинамічними умовами організації горіння. Досліди проводилися в напівзакритих трубах при запалюванні пилу частинок Al, Mg, Zr у відкритого і закритого кінця труби, а також в умовах попередньо перемішаного полум'я пального і окиснювача на пилових пальниках. Показано, що самоорганізація хвильового горіння газозавису в трубах призводить до появи каскаду перехідних режимів горіння, що залежать від місця підпалу і характеристик пилу. При підпалі газозавису біля відкритого кінця труби спостерігалися переходи від ламінарного полум'я, до двох типів вібраційного полум'я, що мають різну фізичну природу, і до розвиненого турбулентного горіння. Ще більш складний каскад структурних змін полум'я спостерігався в разі запалювання суспензії з закритого кінця труби. В цьому випадку в газозависах магнію, алюмінію і алюмомагнієвого сплаву різної дисперсності та концентрації спостерігався каскад переходів від ламінарного полум'я до турбулентного, потім до пульсуючого полум'я, яке переходить в швидке «язикове» горіння. Каскадна зміна режимів горіння пилу в цих умовах супроводжувалася збільшенням швидкості полум'я від 2 до 300 м/с. Встановлено, що наявність цих стадій і швидкості полум'я визначається фізико-хімічними параметрами газозавису. Наведено результати якісних досліджень структури ламінарного полум'я частинок Al, Zr, Ti, Fe на пиловому пальнику. Вперше спостерігалось існування за певних умов оберненого самопідтримуючого-

ся полум'я в пилу дрібнодисперсного заліза. Імовірно, така незвичайна структура фронту горіння пилового полум'я зумовлена кінетичним режимом горіння частинок заліза, для якого характерна екстремальна (з максимумом) залежність швидкості полум'я від концентрації пального.

Ключові слова: самоорганізація процесів горіння, горіння металів, швидкість полум'я, структура фронту полум'я, перехідні режими.

Shevchuk V. G., Poletaev N. I., Ageev N. D., Kiro S. A.

Synergetic aspects of wave dust combustion

SUMMURY

The processes of self-organization of combustion of microdispersed metal particles suspended in oxygen-containing media were experimentally studied. Changes in the structure of the combustion front of the dust flame were observed with a change in the control characteristics of the process specified by the physicochemical characteristics of the gas suspension and the hydrodynamic conditions of the organization of combustion. The experiments were carried out in half-closed tubes when igniting the dust of Al, Mg, Zr particles at the open and closed end of the tube, as well as in the conditions of a pre-mixed fuel flame and oxidizer on dust burners. It is shown that the self-organization of wave combustion of dust in tubes leads to the appearance of a cascade of transient combustion modes, depending on the place of ignition and the characteristics of the dust. When burning a gas suspension at the open end of the tube, transitions from a laminar flame to two types of vibrational flame of different physical nature and to developed turbulent combustion were observed. An even more complex cascade of structural flame changes was observed in the case of ignition of a suspension from the closed end of the tube. In this case, in dusts of magnesium, aluminum, and an aluminum-magnesium alloy of various dispersion and concentration, a cascade of transitions from a laminar flame to a turbulent one, then to a pulsating flame, which turns into fast "tongue" burning, was observed. A cascade change in the dust combustion conditions under these conditions was accompanied by an increase in the flame velocity from 2 to 300 m/s. It was established that the presence of these stages and the flame velocity is determined by the physicochemical parameters of the mixture. The results of qualitative studies of the structure of the laminar flame of particles of Al, Zr, Ti, Fe on a dust burner are presented. For the first time, the existence of a reversed self-sustaining flame in fine dust was observed under certain conditions. Presumably, such an unusual structure of the combustion front of the dust flame is due to the kinetic regime of combustion of iron particles, which is characterized by an extreme (with maximum) dependence of the flame velocity on the concentration of fuel.

Key words: self-organization of combustion processes, metal combustion, flame velocity, flame front structure, transient conditions.