

принадлежат резольвентному множеству и определяются как полюсы интегрального оператора Грина (резольвента Грина) [7]. Эти полюсы имеют ту же кратность, что и собственные значения, входящие в спектр оператора (7) с условием (5). Однако в отличие от действительного спектра оператора (7) с условием (5) полюсы резольвенты Грина могут быть комплексными. Тогда помимо устойчивых и неустойчивых стационарных режимов работы реактора возможны колебательные режимы, как это установлено, например, при исследовании горения водорода и метана в проточном реакторе с перемешиванием [8].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса.— М.: Химия, 1974.
2. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике.— М.: Наука, 1987.
3. Вилюнов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ.— Новосибирск: Наука, 1984.
4. Йосс Ж., Джозеф Д. Элементарная теория устойчивости и бифуркаций.— М.: Мир, 1983.
5. Боднарь Т. А. ФГВ, 1989, 25, 6.
6. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва.— М.: Наука, 1980.
7. Мизохата С. Теория уравнений с частными производными.— М.: Мир, 1977.
8. Вилюнов В. И., Рябинин В. К. ФГВ, 1989, 25, 1, 16.

г. Бийск

Поступила в редакцию 3/IV 1989,  
после доработки — 20/IX 1989

УДК 536.46

В. М. Маслов, С. И. Воюев, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов

### О РОЛИ ДИСПЕРСНОСТИ ИНЕРТНЫХ РАЗБАВИТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССАХ БЕЗГАЗОВОГО ГОРЕНИЯ

При изучении закономерностей горения конденсированных систем (особенно безгазового горения) важную роль играет введение в исходные смеси реагентов инертных разбавителей, позволяющих регулировать температуру  $T$  и скорость процесса  $u$  [1—4]. Анализ показывает, что эффективность разбавителя должна зависеть от его дисперсности (размеров частиц  $d$ ). Этой стороне вопроса посвящена данная статья.

Рассмотрение роли дисперсности инертных разбавителей проведено на примере системы титан — углерод, которая наиболее изучена в процессах СВС [5, 6].

#### Методика эксперимента

Исследования проводились по методикам [7, 8]. Образцы сжигались в инертной среде при небольшом избыточном давлении (10 атм). В работе использовались порошки: титан<sup>1</sup> с  $d = -160$  мкм (удельная поверхность  $S_{уд} = 0,51$  м<sup>2</sup>/г), ламповая сажа марки ПМ-15ТС с  $S_{уд} = 15$  м<sup>2</sup>/г, карбид титана с остаточной пористостью 50 % и  $d = -2500$  мкм, порошки карбида титана и карбида хрома с остаточной пористостью 10 %, а также  $d = -2500$  мкм. Малопористые карбиды титана TiC и хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> получены в режиме горения: TiC — прессованием горячей или сгоревшей смеси Ti + C [9]; Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> — восстановлением алюминием оксида хрома в присутствии углерода [10]. Полученные брикеты измельчались в щековой дробилке и фракционировались на ситах до размеров

<sup>1</sup> Минус перед числом означает, что в порошке имеются частицы размером от долей микрона до указанного числа.

$d$ , мкм: 50, 50—100, 100—160, 160—315, 315—400, 400—630, 630—1000, 1000—1500, 1500—2500. Для порошков TiC  $S_{уд} = 0,86 \div 0,04$  м<sup>2</sup>/г, для Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>  $S_{уд} = 0,5 \div 0,05$  м<sup>2</sup>/г. Величину  $S_{уд}$  определяли объемным методом по адсорбции криптона при температуре жидкого азота и рассчитывали по методу БЭТ с относительной погрешностью +5 %.

Готовилась однородная смесь титана с сажей, в которую затем вводили разбавитель и перемешивали так, чтобы частицы разбавителя не разрушались и размер их не менялся. Во всех экспериментах масса (30 г), диаметр (30 мм) и высота ( $h = 25 \div 30$  мм) образцов оставались постоянными. Образцы сжигались в поджатом состоянии, т. е. размеры их практически не менялись. Воспламенение осуществляли смесью титана с сажей стехиометрического состава. Из этой смеси готовили поджигающую таблетку диаметром 30 и высотой 5 мм, помещали ее между поджимающей пластиной и исследуемым образцом и поджигали нагревом вольфрамовой спирали.

### Результаты экспериментов

На рис. 1 показано изменение скорости горения смеси титана с сажей в зависимости от размеров частиц разбавителя, массовая концентрация которого постоянна  $\alpha = 30$  %. Видно, что с увеличением размера частиц разбавителя  $d$  величина  $u$  первоначально остается постоянной, затем растет, достигает определенного значения и далее не меняется. На последнем участке ( $d = 500 \div 1500$  мкм) величина  $u$  равна соответствующей для неразбавленной смеси. Важно отметить, что различные по пористости, но одинаковые по природе и размерам частицы разбавителя (см. рис. 1, 2, 3) оказывают одинаковое воздействие на приращение скорости горения, при этом образцы, разбавленные более плотными частицами, горят с большими скоростями. В случае разбавления шихты карбидом хрома область изменения  $u$  сдвигается в сторону меньших значений  $d$ , а скорость горения растет быстрее, чем в случае использования карбида титана.

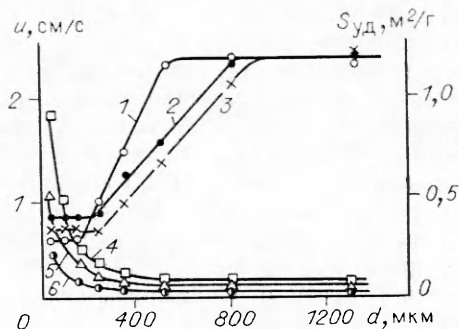
Известно, что с изменением размера частиц порошков сильно меняется и их удельная поверхность. Возникает вопрос, не является ли изменение значения  $S_{уд}$  инертного компонента причиной вариации удельной поверхности контакта реагентов, а следовательно, и скорости горения. Измерения  $S_{уд}$  опровергают подобное предположение (см. рис. 1, 4—6).

Одной из наиболее вероятных причин обнаруженной зависимости может быть то, что при достаточно большом размере частиц разбавителя их характерное время прогрева становится значительно больше времени нахождения в волне горения и система становится малочувствительной к разбавителю. В этом случае в зоне реакции должна быть такая температура, которая могла бы обеспечить наблюдаемую скорость горения (близкая к температуре горения неразбавленной смеси).

Известная методика [8] позволяет исследовать характер температурных профилей и качественно судить о том, что происходит в волне горения и в зоне догорания. Сложность эксперимента заключается в том, что

Рис. 1. Зависимости  $u(d)$  (1—3) и  $S_{уд}(d)$  (4—6).

Разбавители: 1, 6 — Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> литой, 3, 4 — TiC пористый, 2, 5 — TiC прессованный;  $\rho = 2,1 \div 2,2$  г/см<sup>3</sup>.



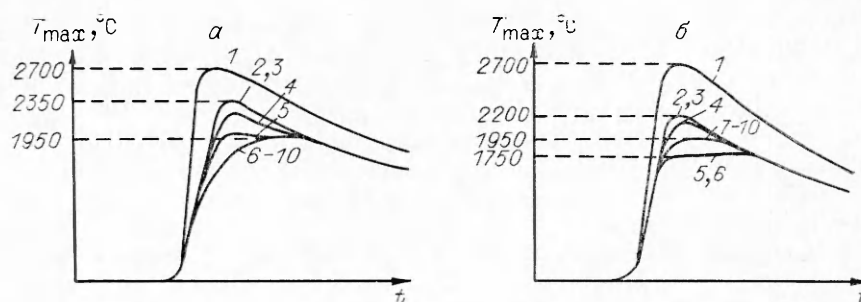


Рис. 2. Характер изменения термограмм в зависимости от размера частиц разбавителя: прессованного TiC (а) и литого Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (б);  $\rho = 2,1 \div 2,2$  г/см<sup>3</sup>,  $\alpha = 30$  %.  $d$ , мкм: 1 — 0, 2 — 1500—2000, 3 — 1000—1500, 4 — 630—1000, 5 — 400—630, 6 — 315—400, 7 — 160—315, 8 — 90—160, 9 — 50—90, 10 — 1—50.

спай термопары должен находиться обязательно между частицами разбавителя, не касаясь их. В противном случае регистрируемое значение  $T_r$  будет занижено за счет холодной частицы разбавителя. В работе в большом числе экспериментов исследован характер изменения значений  $T_r$  при использовании разбавителя различной дисперсности и зарегистрированы сверхадиабатические температуры горения (рис. 2). С увеличением  $d$  (при одной концентрации) характер термограмм меняется: при разбавлении мелкодисперсным составом величина  $T_r$  плавно повышается до значения, близкого расчетному (считалось, что разбавитель прогревается в волне горения до  $T_r$ ), для более крупного инерта максимальная температура начинает превышать расчетную, и тем сильнее, чем больше  $d$ .

Замена одного разбавителя другим (TiC на Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) слабо влияет на характер термограмм: при использовании крупнодисперсных частиц Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> регистрируемая температура горения выше расчетной, равной 1950 °С. Однако есть и различие: применение частиц инерта среднего размера (рис. 2, б, кривые 5, 6) понижает  $T_r$ , которая становится равной температуре плавления Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (1750 °С). Это свидетельствует о том, что мелкие частицы карбида хрома в волне горения плавятся и прогреваются до  $T_{расч}$ , средние (315—630 мкм) не успевают расплавиться и (из-за достаточно большого количества Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> в смеси) термопары фиксируют только процесс плавления карбида хрома; более крупные частицы инерта не успевают прогреться, слабо воздействуют на зону реакции и температура в ней повышается.

Главная особенность обнаруженной зависимости скорости горения от дисперсности разбавителя — это способность смесей, содержащих большое количество инерта (30 %), гореть с такой же скоростью, что и неразбавленные смеси. В связи с этим вполне естественно предположить, что применение крупнодисперсного разбавителя должно существенно расширить концентрационные пределы горения исследуемых смесей. Действительно, замена частиц 50—90 мкм на  $d = 1000 \div 1500$  мкм приводит к увеличению предельной массовой концентрации разбавителя (TiC) с 40 до 53 % (рис. 3, 1, 3). Аналогично замена мелкодисперсного разбавителя (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) с  $d = 50 \div 90$  на крупнодисперсный (1000—1500 мкм) увеличивает  $\alpha$  с 44 до 56 % (рис. 3, 2, 5). Важно отметить, что характер скорости горения для использованных разбавителей различен: в случае малого  $d$  значение  $u$  монотонно понижается с увеличением  $\alpha$ , а для крупнодисперсного разбавителя величина  $u$  постоянна вплоть до срыва горения, очень редко реализуется горение при  $u \approx 0,2 \div 0,25$  см/с. При уменьшении  $d$  с 1000  $\div$  1500 до 630  $\div$  1000 мкм пределы горения смещаются в сторону меньших значений  $\alpha$ .

Определенный интерес представляет и характер изменения скорости и пределов горения смеси Ti + C, содержащей крупнодисперсный инерт, от ее плотности  $\rho$ . Оказалось, что при уменьшении  $\rho$  (рис. 4, 2—4) характер зависимости  $u(\alpha)$  по сравнению с известной (рис. 4, 1) совер-

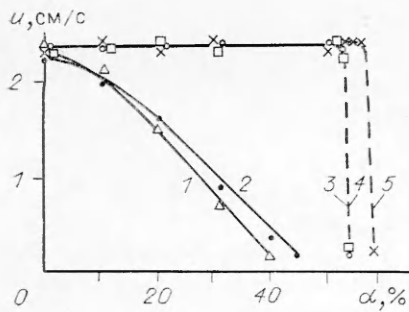


Рис. 3. Зависимость скорости горения от концентрации разбавителя;  $\rho = 2,1 \div 2,2 \text{ г/см}^3$ .  
 $d$ , мкм: 1 — 50—90 (TiC), 2 — 50—90 ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ), 3 — 1000—1500 (TiC — прессованный), 4 — 630—1000 ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$  литой), 5 — 1000—1500 ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$  литой).

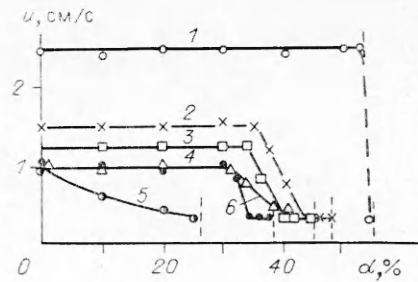


Рис. 4. Зависимость  $u(\alpha)$ .  
 $\rho$ , г/см<sup>3</sup>: 1 — 2,2, 2 — 1,61, 3 — 1,20, 4 — 6 — 0,85;  $d$ , мкм: 1—4 — 630 ÷ 1000, 5 — 50 ÷ 90, 6 — 1000 ÷ 1500.

шенно иной: вначале значение  $u$  остается постоянным, затем при достижении определенной концентрации разбавителя начинает понижаться, достигает для всех случаев практически одного значения и далее не меняется вплоть до потухания. На рис. 4 приведены также зависимости для насыщенной плотности шихты и различных дисперсностей разбавителя (кривые 4—6). Их характерная особенность — прекращение горения во всех случаях практически при одном значении  $u = 0,2 \text{ см/с}$ .

### Обсуждение результатов

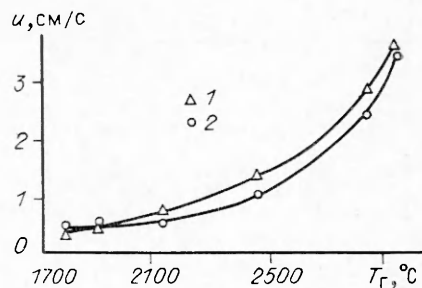
Данная экспериментальная работа связана с целым циклом теоретических исследований [11—14], посвященных вопросам неединственности стационарных режимов распространения волны горения, имеющей тепловую природу. В работе [14] рассмотрены вопросы теории горения конденсированных систем с теплоемкими добавками. Суть такого процесса состоит в следующем. Если добавка высокодисперсная, то идет горение с тепловой гомогенизацией. Если частицы достаточно крупные, то они не полностью прогреваются в волне и относительно слабо принимают участие в процессе теплового воздействия на зону реакции. В промежуточной области размеров в определенных условиях может наблюдаться неединственность режимов горения: в зависимости от условий зажигания можно инициировать либо один, либо другой режим.

Анализ результатов настоящей работы показывает, что основные положения теории подтверждаются экспериментом. Главное здесь — вывод сложной зависимости  $u(d)$  при  $\alpha = \text{const}$ . Ее можно разбить на три области: 1 — область малых и постоянных значений  $u_1$ , 2 — переходная, в ней скорость горения монотонно растет от  $u_1$  до скорости горения неразбавленной смеси  $u_2$ , 3 — скорость горения постоянна и равна  $u_2$ . В области 1 реализуется стационарное горение гомогенной в тепловом отношении смеси, где  $u_1 \ll u_2$ , что связано с большим понижением удельного тепловыделения системы и температуры в зоне реакции соответственно.

Для подтверждения тепловой гомогенизации мелкодисперсного инерта в волне горения рассчитаны и экспериментально определены максимальные температуры горения  $T_{\text{max}}^{\text{расч}}$ ,  $T_{\text{max}}^{\text{эксп}}$  в зависимости от концентрации разбавителя, которые незначительно ( $\sim 100^\circ$ ) отличались в области больших концентраций разбавителя.  $T_{\text{max}}^{\text{расч}}$  находились по методике [15],  $T_{\text{max}}^{\text{эксп}}$  — из температурных профилей. Затем определены зависимости  $u(T_{\text{max}}^{\text{расч}})$  и  $u(T_{\text{max}}^{\text{эксп}})$ . Связь между скоростью горения и  $T_{\text{max}}$  можно приближенно представить в виде

$$u \sim Ae^{-\frac{E}{RT_{\text{max}}}} \quad (1)$$

Рис. 5. Зависимость  $u(T_r)$ ; разбавитель — TiC,  $d = 50$  мкм,  $\rho = 2,1 \div 2,2$  г/см<sup>3</sup>.  
1 — расчет; 2 — эксперимент.



Величины  $u$  и  $T_{\max}$  неразбавленной смеси берем из эксперимента, находим  $A$ , а затем, подставляя в (1) значения  $T_{\max}^{\text{расч}}$ , получаем зависимость  $u(T_{\max}^{\text{расч}})$ . Хорошая сходимость  $u(T_{\max}^{\text{расч}})$  и  $u(T_{\max}^{\text{эксп}})$  (рис. 5) указывает на то, что мелкодисперсный разбавитель прогревается в волне горения.

Область 3 отличается от первой тем, что в зоне горения находятся участки холодного разбавителя, практически не участвующего в теплоотборе из-за большой разницы времен релаксации частиц реагентов и разбавителя. Это приводит к повышению температуры в волне горения и скорости горения. Зона реакции состоит из высокотемпературных участков, где реализуется стационарное горение чистой смеси, и низкотемпературных участков — крупных частиц разбавителя, которые прогреваются лишь в зоне догорания. Это подтверждается наличием сверхадиабатических температур горения систем, содержащих крупнодисперсный разбавитель, и резким понижением  $T_r$  от сверхадиабатической до расчетной (см. рис. 2), что связано с интенсивным теплоотводом из зоны догорания в разбавитель. Структура фронта горения в этом случае аналогична приведенной в работе [14].

В области 2 (переходной) изменяется количество тепла, расходуемого на прогрев частиц разбавителя — чем они крупнее, тем меньше доля массы разбавителя прогревается в волне горения. В случае использования достаточно крупных частиц теплообмен происходит лишь по их поверхности. Это подтверждается более быстрым ростом скорости горения смеси, содержащей  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  (см. рис. 1). Действительно, с ростом размера частиц более тяжелого по сравнению с карбидом титана карбида хрома его удельная поверхность уменьшается значительно быстрее, что приводит к меньшему отводу тепла в частицы  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  и к более быстрому росту величины  $u$ .

Таким образом, в работе экспериментально подтверждается возможность реализации двух предельных режимов горения — низкотемпературного с тепловой гомогенизацией горючего вещества и инерта, и высокотемпературного, связанного с относительно малой теплоотдачей в разбавитель. Согласно [11], в промежуточной области в зависимости от условий зажигания должны осуществляться два типа горения — низко- и высокотемпературный. В данной работе, однако, экспериментально не удалось осуществить два режима (воспламенение проводилось низкотемпературными составами  $\text{Ni} + \text{Al}$  и  $\text{Ti} + \text{C} + \text{TiC}$  с  $T_r = 1650$  и  $1850$  °C и высокотемпературным  $\text{Ti} + \text{C}$  с  $T_r = 3000$  °C). По-видимому, это связано с узостью параметрической области существования этого явления и с достаточно большим отличием рассмотренных в теоретических работах систем типа «сэндвич» и реальных составов.

В [12] выведен критерий неединственности стационарных режимов горения для упрощенной модели:

$$RT_b^{(1)}T_{\max}/E_1(T_b^{(1)} - T_b^{(2)}) < 0,2, \quad (2)$$

где  $T_b^{(1)}$ ,  $T_b^{(2)}$  — температуры горения чистого горючего и гомогенно разбавленного инертном в той же пропорции, что и для «сэндвича»;  $T_{\max}$  — максимальная температура во фронте. При выполнении требований этого критерия возможна неединственность стационарных режимов горения.

Воспользуемся имеющимися данными о температурах процесса в случае использования инерта различной дисперсности (см. рис. 2, *a*) и оценим вероятность появления неединственности режимов горения в системе  $Ti + C$ . Если принять энергию активации  $E = 65\,000$  кал/моль [16], то выражение (2) равно 0,32, т. е. критерий неединственности не выполняется.

Согласно [14], при увеличении концентрации разбавителя возможна не только единственность, но и срыв процесса горения. Экспериментальные исследования показали (см. рис. 3, 3—5), что при достаточно больших значениях  $\alpha$  горение прекращается. Однако в некоторых случаях (очень редко) в образцах реализуется горение со скоростями, на порядок меньшими тех, при которых наблюдается срыв. Влияние разбавителя здесь проявляется, по-видимому, следующим образом. С увеличением концентрации крупнодисперсного разбавителя теплотери растут пропорционально не массе разбавителя, а его поверхности, в связи с чем  $T_r$  и  $u$  меняются незначительно вплоть до предельных концентраций разбавителя. Разбавитель начинает оказывать существенное влияние на горение тогда, когда участки шихты (каналы, ячейки), по которым идет горение, становятся малы, некоторые из них перекрываются и влияние теплотери в стенке каналов (частицы разбавителя) резко возрастает.

Таким образом, существует некая критическая концентрация инерта данной дисперсности, при которой происходит срыв горения или резкое уменьшение скорости горения. Считая, что частицы инерта равномерно распределены в шихте, можно оценить средний критический диаметр канала, при котором наблюдается погасание. Для случая, когда концентрация разбавителя ( $TiC$  с  $d = 1000 \div 1500$  мкм)  $\alpha = 53\%$ , средний критический диаметр канала равен 140 мкм. Ясно, что вероятность перекрытия таких каналов частицами разбавителя достаточно велика. Как видно из рис. 3, 3—5, область концентраций инерта, в которой стационарное горение переходит в погасание, довольно узка ( $\alpha = 50—53\%$ ). Однако при изменении  $\alpha$  с 53 до 50% критический диаметр канала меняется довольно сильно (с 140 до 200 мкм), что, по-видимому, позволяет в редких случаях реализовать горение с предельно малой скоростью, аналогичное горению шихты, разбавленной мелкодисперсным разбавителем.

Вопрос о влиянии плотности шихты, содержащей крупнозернистый инерт, на закономерности и пределы горения практически не изучен. При горении образцов с меньшей плотностью в высокотемпературной области нет срыва горения, а зависимости  $u(\alpha)$  имеют по две точки перегиба (см. рис. 4, 2—4). Большие отличия в характере изменения скорости и пределов горения при варьировании плотностью шихты можно объяснить тем, что кроме теплового фактора (теплоотдача в частицы инерта) в данном случае может действовать структурный фактор (равномерность распределения частиц инерта, величина критического диаметра канала, соотношение закрытых и открытых каналов). Чем меньше  $\rho$  и соответственно  $u$ , тем больший вклад в погасание вносит тепловой фактор. Это выражается в том, что точки перегиба и предела горения смещаются в сторону меньших значений  $\alpha$ . Однако даже при малых скоростях горения существуют области концентраций крупнодисперсного инерта, в которых скорости горения не меняются, т. е. теплотери в частицы инерта несущественны (см. рис. 4, 2—4, 6). В точках, где наблюдается уменьшение  $u$ , инерт начинает отбирать тепло из волны горения. При этом вторая точка перегиба, судя по всему, не означает прекращение прогрева разбавителя, так как при таких концентрациях полностью прогретого инерта смесь бы просто не горела (см. рис. 4, 5). Значение  $u$  в точке перегиба является критическим, а некоторое превышение предельных концентраций разбавителя (см. рис. 4, 2, 3, 6) возможно из-за большого разброса распределения частиц инерта в шихте и в случае неполного прогрева разбавителя.

При увеличении  $\rho$  и  $u$  (см. рис. 4, 1) система становится малочувствительной к теплотериям вплоть до предела горения, горение с большой

скоростью может осуществляться и по тонким каналам, однако в таких условиях растет количество закрытых каналов, что приводит, как правило, к срыву горения. Структурный фактор становится определяющим. В этом случае горение становится похожим на процессы, описываемые теорией «протекания» [17], которая характеризуется наличием критической точки, в которой определенные свойства системы меняются скачкообразно.

Таким образом, дисперсность инерта  $d$  оказывает существенное влияние на характер и закономерности горения, меняет концентрационные пределы и природу погасания. Изменение  $d$  позволяет перевести горение из низкотемпературного режима в высокотемпературный и наоборот. Однако наличие двух режимов не означает, что обязательно существование в промежуточной области неединственности горения в зависимости от условий зажигания. Варьирование плотностью образцов при использовании инерта с разными  $d$  позволяет широко менять концентрационные пределы горения (от 25 до 53 %), при этом погасание системы в зависимости от условий имеет как тепловую природу, так и структурную, связанную с неравномерностью механического смешения шихты и инерта, приводящего к резкому уменьшению количества открытых каналов в области высоких концентраций инерта.

Авторы благодарят К. Г. Шкадинского за обсуждение результатов работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г., Боровинская И. П., Володни Ю. Е. Докл. АН СССР, 1972, 206, 4, 905.
2. Маслов В. М., Боровинская И. П., Мержанов А. Г. ФГВ, 1976, 12, 5, 703.
3. Маслов В. М., Боровинская И. П., Зиятдинов М. Х. ФГВ, 1979, 15, 1, 49.
4. Итин В. И., Братчиков А. Д., Мержанов А. Г. и др. ФГВ, 1981, 17, 3, 62.
5. А. с. 644728, СССР, МКИ С01В 31/60/А. Г. Мержанов.— Бюл. № 4, 1979.
6. Шкиро В. М., Доронин В. М., Боровинская И. П. ФГВ, 1980, 16, 4, 13.
7. Бахман И. И., Беляев А. Д. Горение гетерогенных конденсированных систем.— М.: Наука, 1967.
8. Маслов В. М., Боровинская И. П., Мержанов А. Г. ФГВ, 1978, 14, 5, 79.
9. Мержанов А. Г., Боровинская И. П., Юхвид В. П. и др. // Научные основы материаловедения.— М.: Наука, 1981.
10. Баграмян А. Р., Юхвид В. П., Мержанов А. Г. Закономерности самораспространяющегося высокотемпературного синтеза литого карбида хрома/АН СССР. ОИХФ.— Препр.— Черноголовка, 1979.
11. Ивлева Т. П., Мержанов А. Г., Шкадинский К. Г. Докл. АН СССР, 1981, 256, 4, 897.
12. Ивлева Т. П., Кришеник П. М., Мержанов А. Г. и др. Хим. физика, 1983, 2, 9, 1259.
13. Ивлева Т. П., Кришеник П. М., Шкадинский К. Г. ФГВ, 1983, 19, 4, 87.
14. Шкадинский К. Г., Кришеник П. М. ФГВ, 1985, 21, 2, 52.
15. Новиков И. П., Боровинская И. П., Мержанов А. Г. // Процессы горения в химической технологии и металлургии.— Черноголовка, 1975.
16. Шкиро В. М., Боровинская И. П. // Там же.
17. Эфрос А. Л. // Физика и геометрия беспорядка.— М.: Наука, 1982.

*п. Черноголовка*

*Поступила в редакцию 27/XII 1988,  
после доработки — 17/VIII 1989*

УДК 532.542 : 662.61

*А. С. Лосенков*

#### ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВОГО ПОТОКА С КОЛЕБАНИЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ (ЭНТРОПИИ)

Исследованию динамических процессов в магистральных с протоком газа посвящено большое количество экспериментальных и теоретических исследований [1—12]. Это связано с тем, что трубопроводы с протоком газа встречаются во многих областях техники. В большинстве случаев