

шении  $x$  при постоянном количестве углерода, притом концентрация водорода в конечном продукте также понижается (рис. 2).

Карбогидридная фаза с ГПУ структурой, которая образуется на основе циркония, при увеличении доли ниобия в шихте постепенно уменьшается и исчезает. По-видимому, ниобий в режиме горения не способен к образованию карбогидридной фазы с ГПУ структурой.

На основании экспериментальных данных построена треугольная призма (рис. 3), высота которой соответствует давлению водорода. Основанием призмы служит концентрационный треугольник, для построения которого использованы результаты исследования горения системы  $Zr + Nb + C$  в аргоне. Последующие треугольники по вертикальному сечению призмы построены по результатам горения этой же системы в водороде при различных  $p_H$ . Подобные диаграммы построены не при изотермических условиях. Каждой точке соответствует свое значение  $T_g$ , свойственное конкретной концентрации компонентов. Учитывая, что СВС реакции быстрые (1—10 см/с) и охлаждение продуктов горения происходит за несколько минут, можно считать, что исследованные продукты в некоторой степени закалены. В выделенной в основании призмы области I происходят реакции образования однофазных сложных карбидов. С ростом  $p_{H_2}$  однофазная область сужается. Если соединить эти отдельные области друг с другом, то получится некое пространственное тело, внутри и на поверхности которого каждая точка соответствует однофазному продукту — сложному карбогидриду с ГЦК решеткой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мартirosян Н. А., Долуханян С. К., Мержанов А. Г. ФГВ, 1983, 19, 6, 22.
2. Мартirosян Н. А., Долуханян С. К., Мержанов А. Г. ФГВ, 1985, 21, 5, 53.
3. Хайкин Б. И., Худяев С. И. Докл. АН СССР, 1979, 245, 1, 155.
4. Хайкин Б. И., Худяев С. И. О неединственности стационарного распространения зоны горения при протекании параллельных реакций/АН СССР. ОИХФ.— Препр.— Черноголовка, 1978.
5. Мержанов А. Г., Боровинская И. П. Докл. АН СССР, 1972, 204, 2.

г. Ереван

Поступила в редакцию 17/III 1989,  
после доработки — 30/V 1989

УДК 536.46

В. А. Струнин, А. Н. Фирсов, К. Г. Шкадинский, Г. Б. Манелис

#### СТРУКТУРА ФРОНТА ГЕТЕРОГЕННОГО ГОРЕНИЯ СЛОЕВОЙ СИСТЕМЫ

В [1] исследована модель гетерогенного горения слоевой системы типа сэндвич в предположении усредненных температур и концентраций в слоях в поперечном направлении. Полученные результаты позволили качественно объяснить ряд экспериментальных закономерностей в горении смесевых топлив. Однако детальная структура фронта, распределение скоростей реагирования компонентов и форма поверхности горения не рассмотрены. Работы, учитывающие двумерность процесса и специфику химических реакций, в литературе немногочисленны. В [2] для предельного случая бесконечно больших слоев получена выемка горячей поверхности симметричной конфигурации для случая газофазного пламени, скорость распространения которого находилась из критического условия срыва диффузионного режима горения. В рамках двумерной задачи в [3] рассмотрено влияние кинетических и диффузионных факторов на скорость газофазного горения слоевой системы при условии плоской

© 1990 Струнин В. А., Фирсов А. Н., Шкадинский К. Г., Манелис Г. Б.

поверхности горения и компонентов с одинаковыми размерами, температурами и теплотами газификации. В [4] проведено уточнение граничных условий на поверхности слоевой системы и решения в рамках диффузионной задачи Бурке — Шумана. В [5] методом численного счета изучено воздействие инертного компонента на форму поверхности дефлагрирующего компонента.

**Постановка задачи и решение.** Рассматривается периодически повторяющаяся система из двух плоских слоев окислителя, способного к самостоятельному горению, и горючего, окисляющегося на поверхности. Процессы сублимации, деструкции и диспергирования не учитываются. Сделаем следующее допущение. Будем считать первоначально исходную поверхность горения плоской (нулевое приближение), найдем распределение температур и концентраций на поверхности горения, а затем, исходя из конкретных химических реакций на поверхности, рассчитаем локальные скорости реагирования в каждой точке и форму самой поверхности. Очевидно, что такой упрощенный подход будет иметь в основном качественный характер, тем не менее полученная информация может дать определенные сведения об уровне максимальных скоростей реагирования, о местоположении лидирующей точки, ведущей процесс, о сопоставимости результатов данного подхода и модели с усреднением.

1. Газовая фаза ( $y > 0$ ):

$$\lambda_{\Gamma} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - cu_{\max} \frac{\partial T}{\partial y} = 0,$$

$$\rho_{\Gamma} D \left( \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \right) - u_{\max} \frac{\partial a}{\partial y} = 0.$$

2. Конденсированная фаза ( $y < 0$ ):

$$\lambda_{\kappa} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - cu_{\max} \frac{\partial T}{\partial y} = 0.$$

3. Граничные условия ( $y = 0$ ) на поверхности окислителя ( $0 \leq x \leq \varphi l$ ):

$$\lambda_{\kappa} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0-} = \lambda_{\Gamma} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0+} + Q_{\text{p}} u_{\max},$$

$$a_{\text{п}} u_{\max} - \rho_{\Gamma} D \frac{\partial a}{\partial y} \Big|_0 = zu_{\max}, \quad u_{\text{p}} = A_{\text{p}} e^{-\frac{E_{\text{p}}}{RT_{\text{п}}}},$$

на поверхности горючего ( $\varphi l \leq x \leq l$ ):

$$\lambda_{\kappa} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0-} = \lambda_{\Gamma} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{0+} + Q_{\text{ок}} u_{\max},$$

$$a_{\text{п}} u_{\max} - \rho_{\Gamma} D \frac{\partial a}{\partial y} \Big|_0 = -\gamma u_{\max}, \quad u_{\text{ок}} = a_{\text{п}} \rho_{\Gamma} A_{\text{ок}} e^{-\frac{E_{\text{ок}}}{RT_{\text{п}}}}.$$

4. Условия симметрии:

$$x = 0 \quad \text{и} \quad x = l, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial a}{\partial x} = 0.$$

5. Условия перед и за фронтом горения:

$$y = -\infty, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \quad y = +\infty, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial a}{\partial y} = 0.$$

Здесь  $x, y$  — координаты;  $T$  — температура;  $a$  — относительная концентрация газообразного окислителя;  $u$  — скорость реагирования;  $u_{\max}$  — максимальная массовая скорость, ведущая процесс;  $\rho$  — плотность;  $\lambda, c, D$  — коэффициенты теплопроводности, теплоемкости, диффузии;  $l$  — половина слоя сэндвича ( $L = 2l$ );  $\varphi$  — объемная доля окислителя;  $Q$  —

тепловой эффект;  $E$  — энергия активации;  $A$  — предэкспонент;  $z, \gamma$  — стехиометрические коэффициенты; индексы:  $k$  — конденсированная фаза,  $г$  — газовая фаза,  $p$  — разложение окислителя,  $ок$  — окисление горючего,  $\Pi$  — поверхность,  $n$  — начальное состояние,  $d$  — диспергирование.

Решение имеет вид

$$a_{\Pi} = a_{\infty} + \frac{4(z + \gamma)}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\pi\varphi) \cos\left(k\pi \frac{x}{l}\right)}{k \left[ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi k \lambda_{г}}{c u_{\max} l}\right)^2} \right]}, \quad (1)$$

$$T_{\Pi} = T_{\infty} - \frac{2(Q_{ок} - Q_p)}{c\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\pi\varphi) \cos\left(k\pi \frac{x}{l}\right)}{k \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi k \lambda_{г}}{c u_{\max} l}\right)^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi k \lambda_{к}}{c u_{\max} l}\right)^2} \right]}, \quad (2)$$

где

$$a_{\infty} = a_p - \gamma(1 - \varphi); \quad T_{\infty} = T_n + \frac{\varphi Q_p}{c} + \frac{(1 - \varphi) Q_{ок}}{c};$$

$$u = u_p = A_p e^{-\frac{E_p}{RT_{\Pi}}} \quad (0 \leq x \leq \varphi l); \quad u = u_{ок} = a_{\Pi} \rho_{г} A_{ок} e^{-\frac{E_{ок}}{RT_{\Pi}}} \quad (\varphi l \leq x \leq l).$$

Профиль поверхности горения определяется с помощью соотношения  $u = u_{\max} \cos \alpha$ , где  $\alpha$  — угол между направлением движения фронта и нормалью в данной точке поверхности. Поскольку  $dy/dx = \operatorname{tg} \alpha$ , получаем

$$y = \int_{x_0}^x \frac{\sqrt{1 - (u/u_{\max})^2}}{u/u_{\max}} dx,$$

где за нулевую точку отсчета принята координата с максимальной скоростью и интегрирование ведется по обе стороны от этой точки.

**Алгоритм расчета и результаты.** В качестве исходного независимого параметра принималась величина  $r = u_{\max} l$ , затем рассчитывались  $a_{\Pi}$ ,  $T_{\Pi}$  и  $u$  как функции  $\xi = x/l$  (от 0 до 1), находили максимальную величину  $u$ , которая принималась за скорость, ведущую процесс ( $u_{\max}$ ). Далее определяли размер слоя  $L = 2r/u_{\max}$  и профиль поверхности  $\eta = y/l = F(\xi)$ .

Расчеты проведены при следующих значениях параметров (основной вариант):  $\varphi = 0,7$ ,  $q = Q_{ок}/Q_p = 4$ ,  $\varepsilon_p = cE_p/RQ_p = 10$ ,  $\varepsilon_{ок} = cE_{ок}/RQ_p = 10$ ,  $\lambda_{к}/\lambda_{г} = 5$ ,  $cT_n/Q_p = 0,3$ ,  $2\lambda_{к}/c\rho_{к} = 6,67 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с,  $z = 1$ ,  $\gamma = 0,1$ ,  $A_p = 10^2$  г/(см<sup>2</sup> · с),  $\rho_{г} A_{ок} = 2 \cdot 10^2$  г/(см<sup>2</sup> · с).

На рис. 1 показаны профили концентраций  $a_{\Pi}$ , температур  $\Theta_{\Pi} = cT_{\Pi}/Q_p$ , линейных скоростей разложения  $v_p$ , окисления горючего  $v_{ок}$  и поверхности горения  $\eta$ . При малой толщине слоя  $L = 0,51 \cdot 10^{-3}$  см (рис. 1, а) имеем слабое изменение этих параметров на поверхности горения, отвечающее квазигомогенности системы. Максимальная скорость процесса, которая в данном случае равна скорости окисления горючего ( $v_{\max} \rightarrow v_{ок}$ ), находится на границе контакта компонентов в точке  $\xi = 0,7$ . Форма выемки образована двумя ветвями, одна из которых (для окислителя) является почти прямой и имеет большой наклон, что адекватно меньшей и почти постоянной скорости выгорания.

При  $L = 2,6 \cdot 10^{-3}$  см (рис. 1, б) изменения характеристик становятся сильнее, при этом концентрационные градиенты выражены резче, чем температурные. В силу разнонаправленности этих градиентов максимальная скорость по-прежнему реализуется на границе между компонентами, но скорость разложения окислителя в данном случае становится больше скорости окисления горючего, что зависит от кинетики и термодинамики

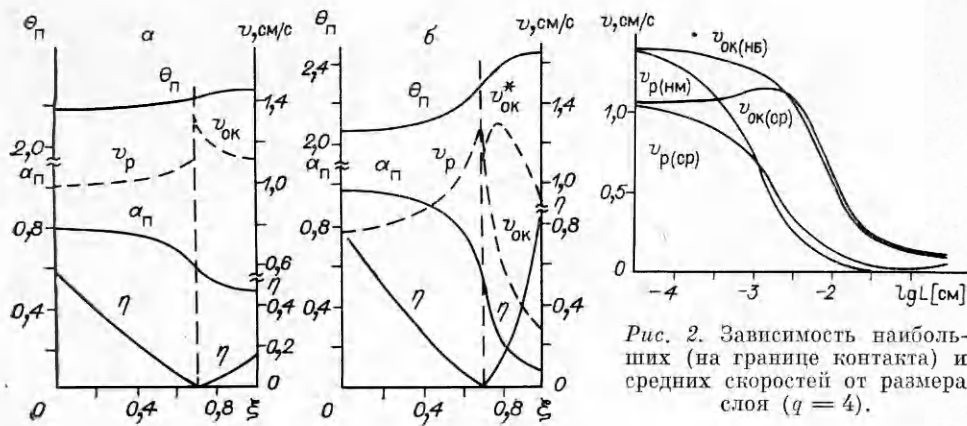


Рис. 1. Распределение характеристик во фронте и форма поверхности  $\eta$  в случае сильноэкзотермичного горючего ( $q = 4$ ).

реакций. Таким образом, здесь происходит смена ведущей стадии-лидера ( $v_{\max} \rightarrow v_p$ ). Однако значения  $v_{\max}$  не обязательно должны находиться на границе контакта. В частности, после изменения кинетических параметров ( $\varepsilon_{\text{ок}} = 60$ ) максимальная скорость окисления горючего  $v_{\text{ок}}^*$  располагается на некотором удалении от границы контакта при  $\xi = 0,77$  (см. рис. 1, б) и ее положение определяется дополнительным условием

$$\frac{\partial v_{\text{ок}}}{\partial x} = \frac{1}{a_{\text{II}}} \frac{\partial a_{\text{I}}}{\partial \xi} + \frac{\varepsilon_{\text{ок}}}{\theta_{\text{II}}^2} \frac{\partial \theta_{\text{II}}}{\partial \xi} = 0.$$

При дальнейшем увеличении размера слоя кривые распределения характеристик во фронте становятся все более крутыми, при этом в области горючего концентрация окислителя и соответственно скорость окисления горючего падают до нуля на некотором расстоянии от границы контакта, например для  $L = 4,6 \cdot 10^{-3}$  см в точке  $\xi = 0,85$ , что эквивалентно 50 %-ной доле несгоревшего горючего. Поэтому при больших  $L$  вводилась поправка на недогорание в значения  $a_{\infty}$  и  $T_{\infty}$ , что позволило в какой-то мере смягчить некорректность модели.

Зависимость наибольших скоростей выгорания окислителя и горючего от размера слоя показана на рис. 2. Скорость окисления горючего  $v_{\text{ок(нб)}}$  непрерывно падает с увеличением  $L$ , кривая скорости разложения окислителя  $v_{\text{р(нм)}}$  имеет максимум. При определенном значении  $L$  происходит смена лидера: при меньших размерах максимальную скорость имеет окисление горючего, при больших — разложение окислителя. Во всех случаях лидирующая точка находится в месте контакта компонентов.

Сравним полученные результаты с моделью усредненных характеристик в слоях компонентов [1] (см. рис. 2). В обоих подходах стационарное распространение процесса обеспечивается максимальной скоростью горения одного из компонентов, но в модели с усреднением другой компонент подстраивается под скорость лидера, за счет диспергирования (сублимации), эквивалентной недогоранию (например,  $v_p + v_d = v_{\text{ок}}$ ), а в двумерной модели также благодаря изменению размера и формы горячей поверхности.

В качественном отношении зависимости в основном похожи: одинаковая асимптотика при  $L \rightarrow 0$ , преимущественное падение скорости, смена лидера. Основные различия состоят в следующем: в усредненной модели  $v_{\text{ок(ср)}}$  уменьшается до нуля при каком-то конечном значении  $L$ , а  $v_{\text{р(ср)}}$ , пройдя через минимум, асимптотически стремится к скорости горения чистого окислителя при  $L \rightarrow \infty$ , тогда как в двумерной модели скорости реагирования обоих компонентов приобретают постоянное минимальное

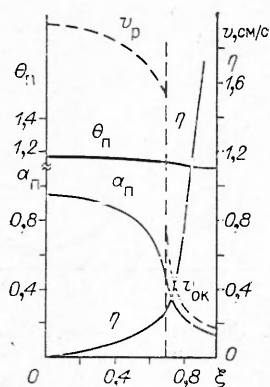


Рис. 3. Распределение характеристик во фронте и форма поверхности в случае слабоэкзотермичного горючего ( $q = 0,5$ ) при  $L = 1,37 \cdot 10^{-3}$  см.

значение, характерное для  $v$  в месте контакта бесконечно больших слоев компонентов.

Рассмотрим теперь случай, когда окисление горючего происходит с малым тепловым эффектом ( $q = 0,5$ ), вследствие чего этот компонент требует теплотозатрат на прогрев, и поэтому практически инертен. Здесь  $v_{\max}$  процесса реализуется в центре слоя окислителя ( $\xi = 0$ ), где находится и лидирующая точка (рис. 3). Концентрационные и температурные градиенты направлены в одну сторону. На поверхности окислителя имеем впадину с пологими стенками, на поверхности горючего — резкий выступ. На рис. 4 приведена зависимость локальных скоростей превращения от размера слоя. Величина  $v_{p(нб)}$  (в центре слоя компонента при  $\xi = 0$ ) увеличивается вместе с  $L$ , что сопровождается ослаблением теплоотвода в слой горючего и повышением температуры окислителя. В точке контакта ( $\xi = 0,7$ ) скорости выгорания обоих компонентов (наименьшая для  $v_{p(нм)}$  и наибольшая для  $v_{ок(нб)}$ ) снижаются с одновременным падением  $\alpha_п$  и  $T_п$ . В модели с усреднением кривая  $v_{p(ср)}$  имеет минимум в зависимости от  $L$ , что качественно соответствует увеличению  $v_{p(нб)}$  и уменьшению  $v_{p(нм)}$ ; при  $L \rightarrow \infty$  средняя скорость выходит на значение, соответствующее горению окислителя в адиабатических условиях. Значение  $v_{ок(ср)}$  уменьшается и при некотором значении  $L$  обращается в нуль.

**Обсуждение результатов и сопоставление с экспериментом.** Теоретическое и экспериментальное изучение слоевых систем, как элементарных моделей, имеет целью раскрытие механизма и закономерностей горения смесевых систем, которые в большинстве своем представляют собой неупорядоченную систему частиц произвольной формы, помещенную в матрицу — полимерное связующее или вязкое горючее. Представим смесевую композицию в виде упорядоченных квадратов одного из компонентов с характерным размером  $L_1$ , в среде другого компонента с характерным размером прослойки  $L_2$ , который нетрудно выразить через объемное соотношение компонентов. Рассмотрим различные взаимодействия в системе.

Пусть в случае *a* (рис. 5) прослойка (квазигомогенное топливо с высокодисперсным окислителем) горит с большей скоростью, чем частица (например, ПХА, нитрамин), при этом между компонентами главным является тепловое взаимодействие, а химическим можно пренебречь. Тогда

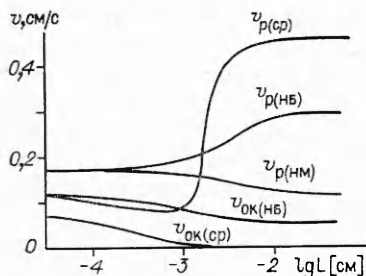


Рис. 4. Зависимости наибольшей (в центре слоя) и наименьшей (на границе) скорости выгорания окислителя, наибольшей скорости выгорания горючего (на границе) и средних скоростей от размера слоя ( $q = 0,5$ ).

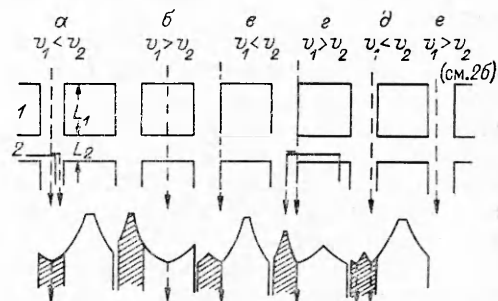


Рис. 5. Различные случаи взаимодействия компонентов в упорядоченной смесевой системе.

да скорость горения будет определяться скоростью распространения фронта по непрерывной матрице ( $v \rightarrow v_2$ ) с учетом теплообмена, зависящего от характерного размера и концентрации частиц. Профиль поверхности представляет собой систему чередующихся выступов (компонент 1) и впадин (компонент 2) симметричной формы с лидирующей точкой в центре прослойки. Срез наверху выступа схематично отражает действие диспергирования (унос несгоревшей части газовым потоком). Если частица сдвинута в сторону и создает преграду для лидирующей точки, то в силу непрерывности прослойки фронт обойдет эту частицу и продолжит свой путь с некоторой задержкой.

В случае *б* скорость сгорания частицы (например, быстрогорящее взрывчатое вещество) больше скорости выгорания матрицы (квазигомогенное топливо или разрушающее горючее). В ограниченном диапазоне значений концентраций и размеров частиц для нахождения средней скорости горения системы можно воспользоваться формулой, полученной в [6] путем суммирования времен сгорания отдельных компонентов:

$$v = \frac{L_1 + L_2}{(L_1/v_1) + (L_2/v_2)}. \quad (3)$$

Здесь, однако,  $v_1$  и  $v_2$  — не константы, зависят от теплообмена между компонентами и являются функциями характерного размера. Кроме того, необходимо учитывать нестационарные явления, возникающие при переходе фронта от одного компонента к другому (например, от быстрогорящего к медленногорящему), и связанные с этим задержки воспламенения. На поверхности горения в этом случае торчит матрица, а в частице образуется яма, в центре которой располагается лидирующая точка.

Примеры *б* — *е* на рис. 5 — случаи химического взаимодействия компонентов (горючее в матрице окисляется под действием газообразного окислителя). Фронт горения распространяется вдоль границы контакта (*в* и *г*). Выемка имеет несимметричную конфигурацию; оба компонента торчат, стенка более крутая и выше у частицы ( $v_1 < v_2$ ) или у матрицы ( $v_1 > v_2$ ). Скорости горения определяются по (1) и (2), а средняя скорость (здесь и далее) — по-прежнему формулой (3).

На рис. 5, *д* рассмотрен режим горения, в котором лидирующая точка находится на некотором удалении от границы контакта (сдвинута в высокотемпературную область из-за высоких значений энергии активации и теплового эффекта реакции окисления). Поверхность выгорания горючего имеет при  $v_1 < v_2$  сложную форму с холмом посередине и двумя ямками (две лидирующие точки). При слиянии этих точек получится структура поверхности, как на рис. 5, *а*. Если  $v_1 > v_2$ , то фронт горения распространяется по границе (см. рис. 5, *е*).

Различные формы поверхности горения, показанные на рис. 5, качественно соответствуют как известным наблюдениям поверхности погашенных образцов топлив на основе ПХА, у которых в ряде случаев при низких давлениях окислитель выступает на поверхности, а при высоких давлениях на нем образуются впадины, так и с результатами детального изучения поверхности горения слоевых (сандвичевых) систем из ПХА и полимера [7].

Резюмируя полученные результаты вместе с данными [4], отметим, что тепло- и массообменные процессы в смесевых системах существенно влияют на характер режима горения, который в зависимости от размера компонентов может быть кинетическим (квазигомогенность), диффузионно-кинетическим (средние размеры), теплообменным (большие размеры), что в свою очередь определяет зависимость скорости горения от давления и начальной температуры, а также форму поверхности. Естественно, что рассмотрение влияния газофазных реакций на процесс горения внесет дополнительные детали и усложнит картину. Тем не менее совместное рассмотрение главных факторов — зависимость скорости химической реакции от давления, массообмен в газовой фазе и теплообмен,

наиболее существенный в конденсированной фазе, которые должны включаться как в модель гетерогенного горения, так и в модель газоза-ного пламени, позволяет считать полученные закономерности достаточно общими и характерными для многих смесевых конденсированных систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Струнин В. А., Фирсов А. Н., Шкадинский К. Г. и др. ФГВ, 1989, 25, 5.
2. Либрович В. Б. ПМТФ, 1962, 4, 33.
3. Новожиллов Б. В. Докл. АН СССР, 1962, 144, 6, 1328.
4. Гусаченко Л. К. ФГВ, 1985, 21, 2, 41.
5. Strahle W. C. AIAA J., 1975, 13, 5, 640.
6. Бахман И. Н., Беляев А. Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем.— М.: Наука, 1967.
7. Price E. W. et al. Comb. Flame, 1986, 63, 3, 381.

*п. Черноголовка*

*Поступила в редакцию 10/VII 1989,  
после доработки — 19/IX 1989*

УДК 536.46 : 536.6

*Л. И. Зайчик, В. А. Першуков*

### ГОРЕНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

К настоящему времени появилось большое количество публикаций, посвященных влиянию турбулентной структуры потока на протекание гомогенных химических реакций [1—3]. Как показано в этих работах, наличие в потоке пульсаций скорости, температуры и концентрации оказывает существенное влияние на интенсивность протекающих процессов. При рассмотрении гетерогенного горения твердого топлива большинство известных методов расчета, например [4—6], не учитывает влияние пульсационной структуры потока на скорость химических реакций, а также обратное влияние дискретной фазы и горения на механизм турбулентного обмена. Такие подходы приемлемы только для крупных (инерционных) частиц, не вовлекающихся в пульсационное движение несущего потока. Для течений без химических реакций известно, что присутствие мелкодисперсной твердой фазы может приводить к существенной перестройке пульсационной структуры турбулентного потока [7—9].

В работах [10, 11] в рамках однопараметрической модели турбулентности, основанной на уравнении баланса турбулентной энергии несущего потока, учитывается воздействие твердой фазы на интенсивность пульсационного движения, однако не учитываются корреляции, связанные с пульсациями скорости химической реакции, что допустимо для диффузионного режима горения частиц.

Цель настоящей работы — разработать модель для расчета газодисперсных турбулентных течений с горящими частицами, учитывающую влияние пульсаций параметров потока на скорость горения, а также обратное воздействие частиц и горения на интенсивность турбулентных пульсаций несущего потока.

#### Уравнения движения и тепло- и массопереноса

Рассматривается двухфазная гетерогенная среда, состоящая из газовой фазы — смеси азота, кислорода, углекислого газа и твердой фазы — монодисперсной системы коксовых частиц радиуса  $r$ , плотность которых  $\rho_2$  считается постоянной. Частицы предполагаются мелкими в том смысле, что основными динамическими и тепловыми механизмами взаимодействия между фазами являются силы и тепловые потоки, связанные