

## ТЕПЛОМАСООБМІН

УДК 536.46

**Орловская С. Г., Калинин В. В., Зуй О. Н., Лисянская М. В.**

*Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, г. Одесса  
e-mail: svetor25@gmail.com*

### **Высокотемпературный теплообмен в двухфракционной газозвеси углеродных частиц**

*В работе изучаются характеристики воспламенения, горения и потухания двухфракционной взвеси углеродных частиц в воздухе при различных температурах. Проведено физико-математическое моделирование высокотемпературного теплообмена и кинетики химических превращений двухфракционной газозвеси с диаметрами частиц мелкой фракции 60 мкм, крупной фракции 120 мкм и равными массовыми концентрациями фракций. Показано, что при низких температурах газа раньше воспламеняются частицы крупной фракции. Найдены температуры и времена горения частиц каждой из фракций, параметры их потухания.*

Актуальность исследований обусловлена необходимостью создания эффективных методов сжигания углеродных топлив в газодисперсном виде [1, 2]. Топливо, используемое в энергетических устройствах, содержит частицы разного размера. Двухфракционная газозвесь – частный случай топлива полидисперсного состава.

**Целью работы** является изучение характеристик воспламенения и горения двухфракционной взвеси углеродных частиц в воздухе при различных температурах.

**Физико-математическое моделирование** высокотемпературного теплообмена газозвеси углеродных частиц включает дифференциальные уравнения теплового и массового балансов для частиц каждой из фракций и соответствующие уравнения для газовой смеси, содержащей окислитель [3, 4]. Изучим высокотемпературный теплообмен и кинетику химического превращения двухфракционной газозвеси углеродных частиц с диаметрами частиц, отличающимися в несколько раз и равными массовыми концентрациями фракций.

**Постановка задачи.** Рассмотрим нестационарный теплообмен полидисперсной газозвеси углеродных частиц в воздухе, на поверхности которых протекают две параллельные химические реакции:  $C + O_2 = CO_2$  (I) и  $2C + O_2 = 2CO$  (II).

Уравнение теплового баланса частицы  $i$ -той фракции с учетом ее теплообмена с газом и стенками реакционной установки запишем в виде:

$$\frac{c\rho d_i}{6} \frac{\partial T_i}{\partial t} = q_{ch\ i} - q_{\alpha\ i} - q_{wi}, \quad T_i(t=0) = T_{ib}, \quad (1)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость частицы, Дж/кг К;  $\rho_i$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $d_i$  – диаметр частицы  $i$ -той фракции, м;  $T_i, T_{ib}$  – текущая и начальная температуры частицы, К;  $t$  – время, с;  $q_{ch\ i}$  – суммарная плотность химического тепловыделения на поверхности и в порах частицы, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{\alpha\ i}$  – плотность теплового потока у поверхности частицы, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{wi}$  – плотность теплового потока излучением от частицы к стенкам реакционной установки, Вт/м<sup>2</sup>.

Суммарную плотность химического тепловыделения, за счет протекания химических реакций на внешней и внутренней поверхностях частицы, используя [5, 6], найдем из выражения:

$$q_{ch\ i} = (k_{1i}q_1 + k_{2i}q_2) \rho_g n_{O_2,si} (1 + K_i), \quad K_i = \frac{k_{vi}}{k_{1i} + k_{2i}}, \quad (2)$$

где  $k_{1i}, k_{2i}$  – константы скоростей химических реакций (I) и (II), м/с;  $q_1, q_2$  – тепловые эффекты химических реакций (I) и (II), рассчитанные на единицу массы кислорода, Дж/кг O<sub>2</sub>;  $\rho_g$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $n_{O_2,si}$  – относительная массовая концентрация кислорода на поверхности углеродистой частицы;  $K_i$  – отношение констант внутреннего и поверхностного реагирования,  $k_{vi}$  – эффективная константа внутреннего реагирования.

Запишем выражение для концентрации кислорода на поверхности частицы:

$$n_{O_2,si} = \frac{\beta_i}{\beta_i + (k_{1i} + k_{2i} + P_{sfi}) \cdot (1 + K_i)} n_{O_2,sg}, \quad (3)$$

$P_{sfi}$  – скорость перемещения газообразных компонент стефановским течением в кинетической области протекания химических реакций [7].

Теплообмен каждой частицы с газом определяется плотностью теплового потока на поверхности частицы  $q_{\alpha\ i}$ , включая молекулярно-конвективный механизм переноса тепла  $q_{\lambda\ i}$  и переноса тепла стефановским течением  $q_{sfi}$  [7]:

$$q_{\alpha\ i} = q_{\lambda\ i} + q_{sfi}, \quad q_{\lambda\ i} = \alpha_i (T_i - T_g), \quad q_{\alpha\ i} = \alpha_i \left[ (T_i - T_g) + \frac{u_{sfi}}{2} (T_i + T_g) \right] \quad (4)$$

$$\alpha_i = \frac{Nu \lambda_g}{d_i}, \quad (5)$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент теплообмена частицы, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К),  $T_g$  – температура газа, К.

Используя законы Стефана - Больцмана и Кирхгофа, запишем выражение для теплового потока излучением с единицы поверхности частицы газозвеси к стенкам реакционной установки:

$$q_{wi} = \varepsilon \sigma (T_i^4 - T_w^4), \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент черноты углерода;  $T_w$  – температура стенок реакционной установки, К;  $\sigma = 5.67$  Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup> – постоянная Стефана-Больцмана.

При горении газозвеси уменьшаются со временем диаметр и плотность частиц вследствие протекания химических реакций на их наружной и внутренней поверхности (внутри пор). Дифференциальные уравнения массового баланса для диаметра и плотности частицы углерода  $i$ -той фракции запишем в виде:

$$-\frac{1}{2}\rho_i \frac{\partial(d_i)}{\partial t} = W_{s_i}, \quad W_{s_i} = \frac{M_C}{M_{O_2}}(k_{1i} + 2k_{2i})n_{O_2,s_i}\rho_g, \quad d_i(t=0) = d_b, \quad (7)$$

$$-\frac{1}{6}d_i \frac{\partial(\rho_i)}{\partial t} = W_{s_i}K_i, \quad \rho_i(t=0) = \rho_b. \quad (8)$$

где  $d_b$  – начальный диаметр частицы, м;  $\rho_b$  – начальная плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>.

Важным параметром газозвеси является его массовая концентрация  $C_m$ , которая зависит от диаметра частиц и их численной концентрации  $C_{N_i}$ :

$$C_m = \sum_{i=1}^n C_{m_i}, \quad C_{m_i} = \frac{1}{6}\pi \cdot d_i^3 \cdot \rho_i \cdot C_{N_i}, \quad C_{N_i} = \frac{N_i}{V_g}, \quad (9)$$

где  $C_{m_i}$  – массовая концентрация (кг/м<sup>3</sup>), а  $C_{N_i}$  – численная концентрация (м<sup>-3</sup>)  $i$ -той фракции твердой фазы газозвеси;  $N_i$  – число частиц в  $i$ -й фракции.

Таким образом, в процессе горения массовая концентрация топлива уменьшается, так как уменьшаются диаметр и плотность частиц, а численная концентрация является неизменной до момента полного выгорания.

С учетом внешнего тепло- и массообмена изменение температуры газа и концентрации окислителя с течением времени описывается уравнениями:

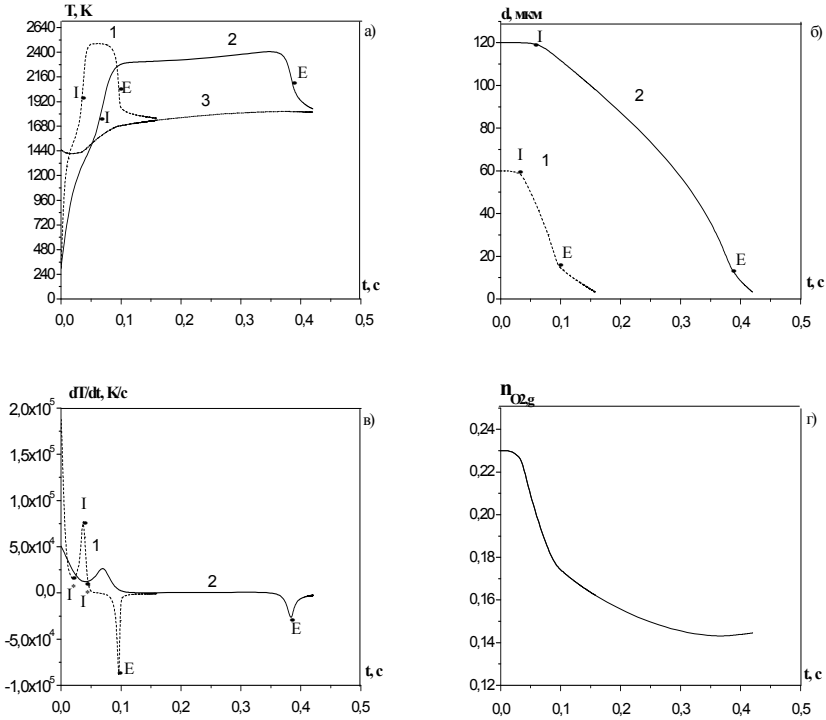
$$c_g \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \sum_{i=1}^n S_i C_{N_i} q_{\alpha i} + \alpha_g F_g (T_g - T_{g\infty}), \quad T_g(t=0) = T_{g\infty}, \quad (10)$$

$$\alpha_g = \frac{Nu_g \lambda_g}{d_g}, \quad F_g = \frac{S_g}{V_g},$$

$$-\frac{\partial n_{O_2,g}}{\partial t} = \sum_{i=1}^n C_{N_i} S_i n_{O_2,s_i} (k_{1i} + k_{2i} + k_{v_i}) - F_g \beta_g (n_{O_2,\infty} - n_{O_2,g}), \quad n_{O_2,g}(t=0) = n_{O_2,\infty}, \quad (11)$$

$$\beta_g = \frac{Sh_g D_g}{d_g}, \quad D_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g},$$

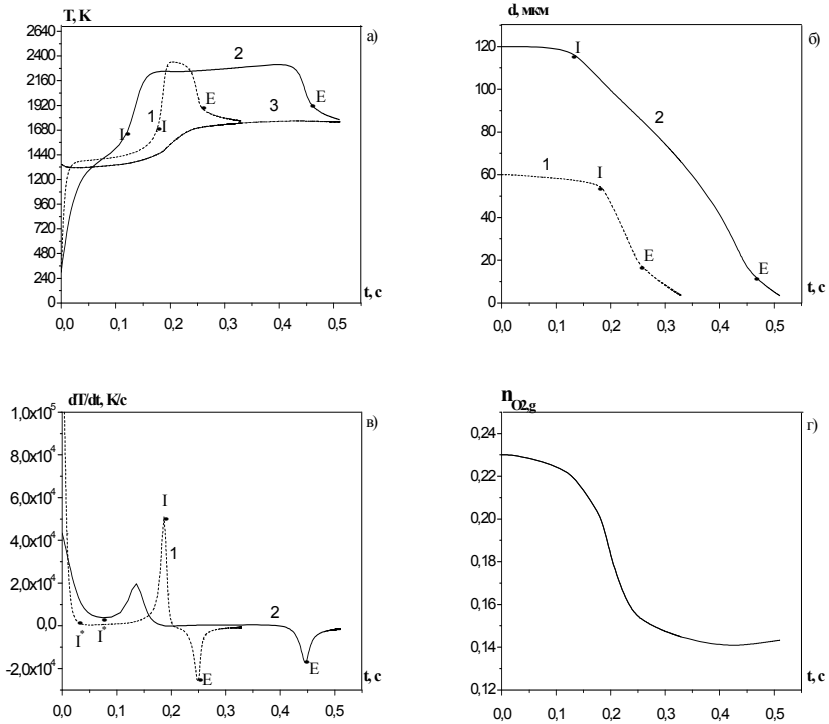
где  $S_i$  – площадь поверхности частицы  $i$ -той фракции, м<sup>2</sup>;  $c_g$  – удельная теплоемкость газа, Дж/кг К;  $T_{g\infty}$  – температура газовой среды, окружающей газозвесь, К;  $\alpha_g$  – коэффициент теплообмена газозвеси с окружающей средой, Вт/м<sup>2</sup>К;  $Nu_g$  – критерий Нуссельта, задающий теплообмен газозвеси с окружающей средой;  $F_g$  – удельная поверхность газозвеси, м<sup>-1</sup>;  $S_g$  – поверхность газозвеси, м<sup>2</sup>,  $\beta_g$  – коэффициент массообмена газозвеси с окружающей средой, м/с;  $n_{O_2,\infty}$  – относительная массовая концентрация кислорода в среде, окружающей газозвесь.



**Рис. 1.** Зависимости  $T$ ,  $T_g$ ,  $dT/dt$  от времени для двухфракционной газозвеси при  $T_{g\infty} = T_w = 1450$  К. 1 –  $d_{b1}=60$  мкм, 2 –  $d_{b2}=120$  мкм, 3 – температура газа  $T_g$ .  $C_{mb}=0.016$  кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, физико-математическая модель (1) - (11) описывает нестационарный высокотемпературный тепломассообмен и кинетику химического превращения полифракционной газозвеси углеродных частиц. Расчеты представленных уравнений позволяют определить основные характеристики горения газозвеси: период индукции, время и температуру горения, критические параметры воспламенения и потухания.

**Анализ результатов.** На рис.1 представлены временные зависимости температур частиц каждой из фракций, температуры газа, временных производных температур частиц по времени при горении двухфракционной ( $i = 2$ ) газозвеси при различных температурах газа. Начальная массовая концентрация углеродного топлива в газозвеси составила  $C_{mb} = 0.016$  кг/м<sup>3</sup>, массовые концентрации каждой из фракций равны:  $C_{mb1}=C_{mb2} = 0.008$  кг/м<sup>3</sup>. Газозвесь с указанной массовой концентрацией характеризуется коэффициентом избытка кислорода, рав-

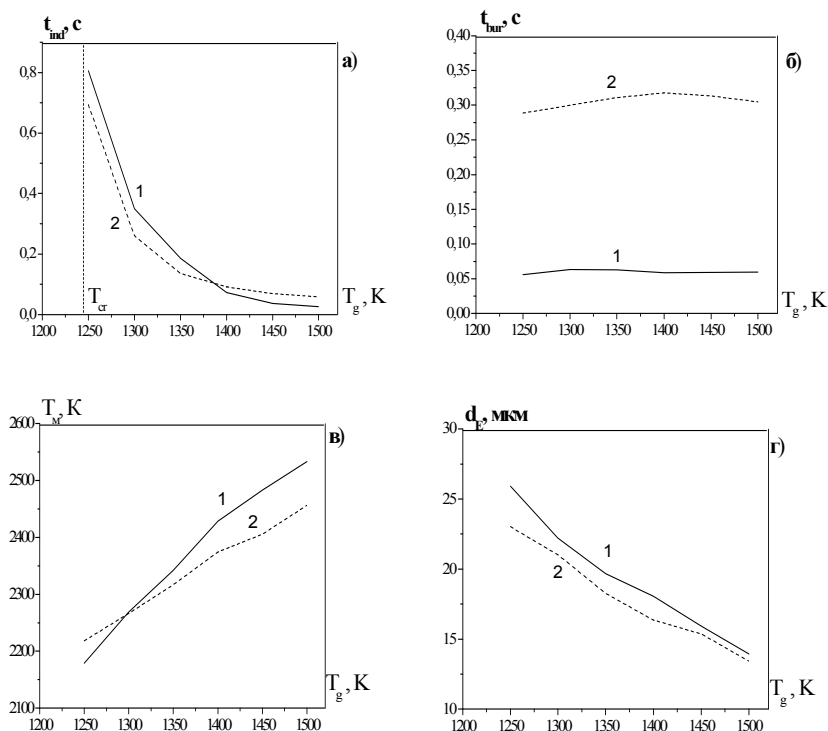


**Рис. 2** Зависимости  $T$ ,  $T_g$ ,  $dT/dt$  от времени для двухфракционной газозвеси при  $T_{g\infty} = T_w = 1350$  К. 1 –  $d_{b1} = 60$  мкм, 2 –  $d_{b2} = 120$  мкм, 3 – температура газа  $T_g$ .  $C_{mb} = 0.016$  кг/м<sup>3</sup>.

ным 1.5 [1, 2]. Следовательно, кислорода достаточно для полного сгорания топлива. Экстремумы на зависимостях  $dT/dt(t)$  позволяют определить моменты воспламенения ( $t$ . I) и потухания ( $t$ . E) частиц и найти, соответственно, время задержки воспламенения и время горения.

Анализ температурных кривых показывает, что при высокой температуре газа сначала происходит воспламенение и выгорание мелкой фракции (рис. 1а-г). Частицы крупной фракции воспламеняются незадолго до момента потухания мелких частиц. За время выгорания мелкой фракции концентрация кислорода существенно уменьшается, поэтому возгорание и последующее горение крупной фракции происходит при низких ее значениях.

При более низкой температуре газа (рис. 2а-г) раньше воспламеняются крупные частицы (кривые 2). Согласно (5) мелкие частицы имеют больший коэффициент теплоотдачи. Поэтому увеличение времени воспламенения мелкой фракции по сравнению с крупной объясняется ростом теплового потока от частиц малых размеров при понижении температуры газа (формула (4)).



**Рис.3.** Зависимости времени задержки воспламенения (а), времени горения (б), максимальной температуры горения (в) и диаметра частиц при потухании (г) двухфракционной газозвеси от температуры газа 1 –  $d_{b1}=60$  мкм, 2 –  $d_{b2}=120$  мкм,  $C_{mb}=0.016$  кг/м<sup>3</sup>.

Как видно из рис.1в и 2в время задержки воспламенения  $t_{ind}$  (длительность прогрева от начала прогрева до  $t_I$ ) состоит из двух частей: времени инертного прогрева частицы до температуры, близкой к температуре газа (до  $t_{I^*}$ ) и времени химического разогрева, обусловленного активизацией упомянутых химических реакций (от  $t_{I^*}$  до  $t_I$ ). При уменьшении температуры окружающего газа для мелких частиц увеличивается время химической стадии (рис.2, в), за которое температура газа в объеме газозвеси достигает более высокого значения, необходимого для воспламенения (рис.2а). Таким образом, в области высоких температур время задержки воспламенения двухфракционной газозвеси определяется временем задержки мелких частиц, а в области низких температур – временем задержки частиц крупной фракции (рис.2а).

При некоторой критической температуре газа  $T_{cr}$  (рис. 3а) газозвесь не воспламеняется. Критическая температура воспламенения двухфракционной газозвеси значительно ниже температуры воспламенения одиночных частиц того же диаметра. Причем, критические температуры воспламенения для оди-

ночных крупных и мелких частиц существенно различаются, а в условиях двухфракционной газозвеси практически совпадают.

Проанализируем характеристики горения двухфракционной газозвеси. На рис.3б-г представлены зависимости времени горения и критического диаметра потухания от температуры газа для частиц крупной и мелкой фракций в составе двухфракционной газозвеси. Из рис. 3б видно, что времена горения частиц мелкой и крупной фракций газозвеси слабо зависят от температуры. Время горения крупной фракции практически в 4 раза превышает время горения мелкой фракции при отношении их начальных диаметров равных 2.

Температура горения частиц мелкой фракции в области низких температур газа меньше, чем крупных (рис.3, б) по причине больших теплопотерь к газу и недостатка окислителя на стадии горения. Концентрация окислителя к моменту горения мелких частиц существенно уменьшается в результате реагирования с крупными частицами (рис.1г, рис.2г).

**Выводы.** Установлено, что при температурах газа выше 1400 К время задержки воспламенения двухфракционной газозвеси определяется временем воспламенения мелкой фракции, ниже этого значения – временем воспламенения крупной фракции. Например, для температуры газа 1500К период индукции мелких частиц (фракция 60 мкм) в 2 раза меньше периода индукции крупных частиц (фракция 120 мкм). При температурах меньше газа меньше 1400К период индукции мелкой фракции больше, чем крупной и при понижении температуры газа эта разница увеличивается. Это связано с увеличением теплопотерь молекулярно-конвективным путем в окружающую газовую среду для мелкой фракции. Найдены температуры воспламенения двухфракционных газозвесей. Критическая температура воспламенения частиц газозвеси значительно ниже, чем для одиночных частиц того же диаметра. Понижение температуры воспламенения газозвеси происходит вследствие разогрева газа за счет тепла химических реакций при окислении совокупности частиц. Причем, для крупных и мелких одиночных частиц углерода критические температуры газа существенно разнятся, а в условиях двухфракционной газозвеси - практически совпадают. Определен интервал температур окружающего газа и стенок реакционной установки, для которого температура горения частиц мелкой фракции меньше, чем частиц крупной фракции газозвеси. Так для температур газа выше 1250 К горение мелкой фракции происходит при более высоких температурах. Получено, что для температуры газа 1500К температура горения мелких частиц более, чем на 200 градусов превышает температуру горения крупных частиц газозвеси. В отличие от одиночных частиц, потухание газозвеси протекает в вырожденном режиме, так как разность температур частиц и газа мала. При этом происходит доокисление частиц газозвеси в кинетическом режиме, что дает возможность оценить время полного их преобразования.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Основы практической теории горения // Под. ред. Померанцева В. В. – Л.: Энергия, 1973. – 263 с.

2. *Бабий В.И., Куваев Ю.Ф.* Горение углеродной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоатомиздат, 1986.– 205 с.
3. *Orlovskaya S. G., Kalinchak V. V., Zuy O. N., Mandel O. V., Kachan S. V.* Heat and mass transfer and critical phenomenas in the gas mixture sof carbon particles //Ukrainian Journal of Physics. – 2011.– Т.56, №12. – С.1305-1311.
4. *Орловська С. Г.* Дослідження закономірностей горіння газозависів вуглецевих частинок // Фізика і хімія твердого тіла. – 2015. –Т. 16, № 1. – С. 210-216.
5. *Калинчак В. В., Зуй О. Н., Орловская С. Г.* Влияние температуры и диаметра пористых углеродных частиц на кинетику химических реакций и тепломассообмен с воздухом.//Теплофизика высоких температур. – 2005. – Т.43, №5. – С.780-788.
6. *Орловская С. Г., Калинчак В. В., Зуй О. Н.* Влияние внутреннего реагирования на характеристики высокотемпературного тепломассообмена газозвесей углеродных частиц// Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т.52, №5. – С.746-753.
7. *Калинчак В. В., Орловская С. Г., Калинчак А. И., Дубинский А. В.* Тепломассообмен углеродной частицы с воздухом при учете стефановского течения и теплопотерь излучением.//Теплофизика высоких температур – 1996. – Т.34, № 1. – С.83-91.

**Orlovskaya S. G., Kalinchak V. V., Zuj O. N., Liseanskaia M. V.  
Burning of Two-Fraction Coal-Air Suspension**

SUMMARY

*Two fraction dust-air mixture is a simplest case of polydisperse suspension. So the purpose of this work is to study the characteristics of ignition and combustion of a two-fraction suspension of carbon particles in air at different temperatures. The main characteristics of fuels combustion are the ignition delay, the burning temperature and time, critical parameters (temperature, the particles diameters and mass concentrations), corresponding to fuel ignition and extinction. The high temperature heat and mass transfer and chemical kinetics are modeled for two-fraction gas suspension (diameter of fine particles 60  $\mu\text{m}$  and that of coarse particles 120  $\mu\text{m}$ ).*

**Орловська С. Г., Калинчак В. В., Зуй О. М., Лисянська М. В.  
Горіння двофракційного газозавису вуглецевих частинок**

АНОТАЦІЯ

*В роботі вивчаються характеристики займання, горіння і потування двофракційної суспензії вуглецевих частинок в повітрі при різних температурах. Проведено фізико - математичне моделювання високотемпературного тепломасообміну та кінетики хімічних перетворень двофракційної газосуспензії з діаметрами частинок дрібної фракції 60 мкм, великої фракції 120 мкм і рівними масовими концентраціями фракцій. Показано, що при низьких температурах газу раніше спалахують частки великої фракції. Знайдено температури і часи горіння частинок кожної з фракцій, параметри їх потування.*