

УДК 536.46

Орловська С.Г.

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, Одеса, Україна,
вул. Дворянська, 2, 65082, e-mail: svetor25@gmail.com

Дослідження впливу зовнішнього тепло- і масообміну на особливості горіння і згасання газозависів вуглецевих частинок

В роботі вивчено закономірності впливу тепло- та масообміну газозависів вуглецевих частинок із зовнішнім газовим середовищем на процеси займання, горіння і затухання при різних масових концентраціях вуглецевого палива. Розглядається монодисперсний газозавис вуглецевих частинок, що знаходиться в нагрітому до високої температури газі, який містить окислювач. Внаслідок проведеного фізико-математичного моделювання визначено наступні характеристики високотемпературних процесів: період індукції, час горіння та час повного перетворення частинок, критичні параметри займання та згасання частинок. Проаналізовано вплив на ці характеристики початкового діаметра частинок, масової концентрації та температури оточуючого газу. Встановлено, що зовнішній тепломасообмін незначно впливає на період індукції та критичні параметри займання газозависів, але достатньо сильно позначається на характеристиках процесів горіння і згасання. Доведено існування верхньої межі за концентраціями палива та діаметрами частинок, за яких не спостерігається повного згорання газозависів в умовах відсутності зовнішнього масообміну. Знайдено інтервали масових концентрацій для яких здійснюється повне перетворення вуглецевого палива, що використовується у вигляді газозависів. Показано, що для відкритих газозависів область масових концентрацій, де спостерігається повне перетворення частинок, розширюється у бік великих значень. Діаметри частинок, що характеризують згасання газозависів, з урахуванням зовнішнього масопереносу менше, в результаті більшого надходження кисню до об'єму газозавису.

Ключові слова: тепломасообмін, займання, горіння, згасання, вуглецеві частинки, газозависи.

Одним із видів викопного палива, яке широко використовується в паливній енергетиці, є вугілля. За рахунок його подрібнення, воно легше займається і краще горить, крім того має велику теплоту виділення. Дослідження високотемпературного тепломасообміну та хімічного перетворення диспергованого палива у вигляді газозависів є актуальними для розробок екологічно чистих та безвідходних технологій їх спалювання в енергетичних устроях. Розробка раціональних методів використання вугільного палива, вирішення задач пожежобезпеки в шахтах та виробництві базується на вивченні закономірностей їх займання, горіння та згасання за різних режимів тепломасообміну. На сьогодні активно розроблюються фізико-математичні моделі горіння сумішей частинок вугільного пилу з повітрям та пропано-повітряними сумішами в різних реакційних об'ємах при різних масових концентраціях пилу та концентраціях окислювача [1-6]. Але питання щодо ролі зовнішнього тепломасообміну в процесах горіння та згасання газозависів детально не розглядається.

Мета даної роботи – на основі проведення фізико-математичного моделювання вивчити вплив зовнішнього тепло- та масообміну газозависів з навко-

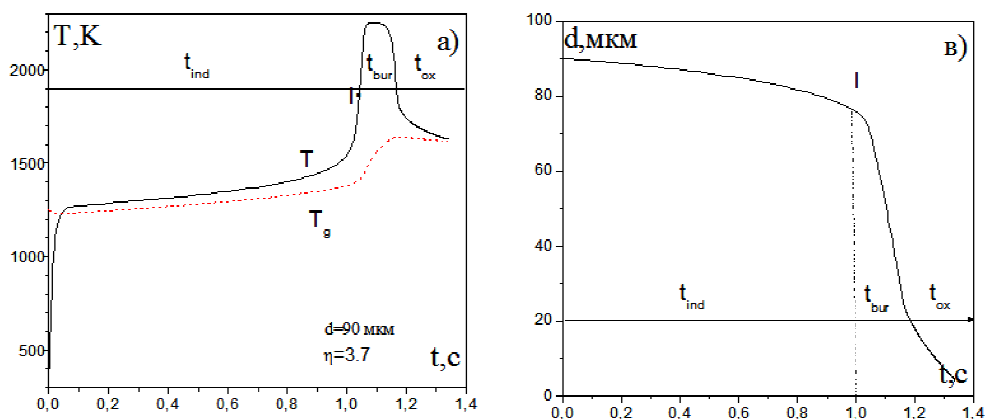


Рис. 1. Залежності температури та діаметра частинки від часу для початкового діаметру $d_b=90$ мкм, масової концентрації палива $C_m=0,014$ кг/м³, температури оточуючого газу $T_{g^\infty}=1250$ К.

лишнім середовищем на характеристики займання і горіння (період індукції, час, температуру горіння) та повноту згоряння диспергованого вуглецевого палива в залежності від його масової концентрації, зміна якої відбувається за рахунок початкового діаметру частинок.

Високотемпературний тепломасообмін і кінетика окислення газозависів вуглецевих частинок описуються диференційними рівняннями, які задають зміну їх температури, маси, температури газу, що містить окисник та концентрації окисника в газі [7, 8]. З урахуванням тепломасообміну поверхні газозавису з навколишнім газовим середовищем визначимо газозавис таким, що є відкритим, без урахування - закритим. Відкриті газозависи спостерігаються, наприклад, при вибухах вугільного пилу в шахтах, коли в газовому середовищі виникає хмара горючих частинок. Також можна впроваджувати відкриті газозависи в камерах згоряння енергетичних устроїв, забезпечуючи вільний доступ кисню до реагуючого об'єму.

По результатам фізико-математичного моделювання задачі [7, 8] проведемо аналіз впливу зовнішнього масо-і теплообміну на характеристики займання, горіння та згасання монодисперсного газозавису вуглецевих частинок при різних масових концентраціях.

Реакційна здатність газозавису залежить від коефіцієнта надлишку окислювача [9, 10] в газовому середовищі, який, в свою чергу, залежить від масової концентрації вуглецевого палива. Масова концентрація визначається діаметром частинок d та їх чисельною концентрацією C_N в об'ємі газозавису:

$$C_m = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho C_N, \quad (\rho - \text{густина вуглецевої частинки}).$$

На рис.1 представлені часові залежності температури (T) і діаметра (d) частинок газозавису в процесі займання, горіння та згасання для масової концентрації палива $C_m=0.014$ кг/м³ та коефіцієнта надлишку кисню в повітрі $\eta = 3.7$. Точка I на рис.1 – момент займання частинки за час, що дорівнює періоду індукції (t_{ind}) [11]. На стадії горіння (t_{bur}) відбувається основне зменшення діаметру частинки. Остання низькотемпературна стадія – доокислення частинки тривалістю t_{ox} протікає у кінетичному режимі та характеризується повільним змен-

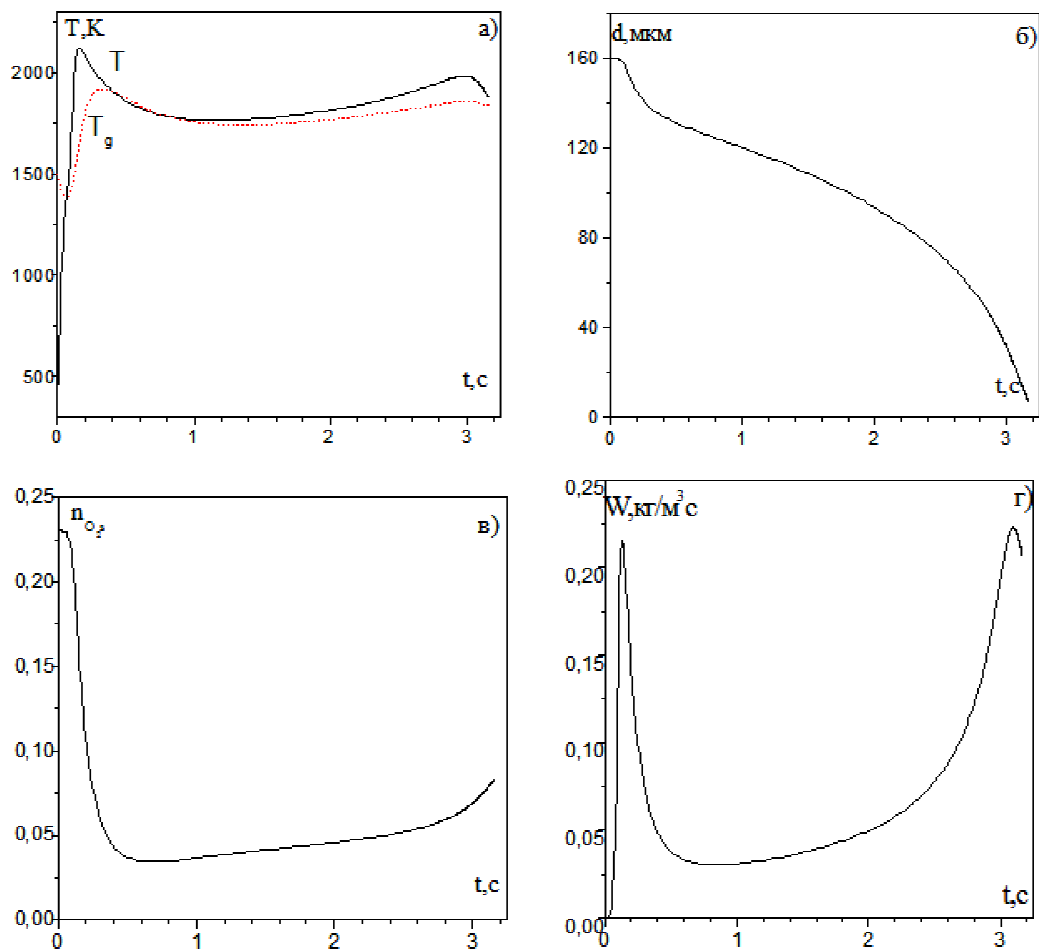


Рис.2. Часові залежності $T, d, n_{O_{2,s}}, W$ для щільного газозавису частинок з урахуванням зовнішнього масообміну з навколишнім середовищем. $d_b = 160$ мкм, $C_m = 0.06$ кг/м³, $T_{g\infty} = 1500$ К.

шенням її температури і діаметра. Час повного перетворення частинки t_{full} включає час горіння і час доокислення частинки до нуля, що відраховується після моменту її згасання: $t_{full} = t_{bur} + t_{ox}$, (рис.1). Зі збільшенням масової концентрації палива в газозависі тривалість стадії доокислення зростає, що визначається зменшенням температури частинок та концентрації кисню біля їх поверхні після моменту згасання.

На рис.2 представлені часові залежності температури, діаметра частинки, концентрації кисню $n_{O_{2,s}}$ та швидкості хімічного реагування W на поверхні частинки для щільного газозавису з урахуванням зовнішнього масо-і теплообміну. На стадії займання концентрація кисню різко зменшується (рис.2,в). Потім спостерігається двостадійний режим горіння. На першій стадії діаметр частинки змінюється з великою швидкістю, а потім відбувається гальмування швидкості хімічної реакції внаслідок зменшення концентрації окислювача. Високотемпературна стадія протікає у перехідному режимі досить тривалий час. При цьому, внаслідок зменшення діаметра та збільшення концентрації кисню на поверхні частинки, швидкість хімічних перетворень знову зростає (рис.2 г). До кінця високотемпературної стадії збільшується також і коефіцієнт надлишку кисню.

Температура горіння зростає і досягає вдруге максимального значення. Високотемпературний режим завершується виродженим режимом згасання, в якому частинки, що вже досягли досить малого діаметра, доокислюються. Таким чином, з урахуванням зовнішнього масообміну спостерігаються, хоч і досить тривалі, але фіксовані часи повного перетворення частинок.

У разі закритого газозавису кисень в об'ємі незабаром вигоряє. Хімічна реакція на поверхні частинок протікає в кінетичному режимі, та згодом згасає. Частинки щільних газозависів за таких режимів масообміну згасають при діаметрі, близькому до початкового.

Періоди індукції відкритих і закритих газозависів відрізняються незначно. Критичні діаметри та масові концентрації частинок, що характеризують займання газозависів з урахуванням і без урахування зовнішнього масообміну при $T_{g\infty}=1250$ К мають наступні близькі значення: відкриті газозависи: $d_I=82$ мкм, $C_{mI}=0.008$ кг/м³; закриті газозависи: $d_I=78$ мкм, $C_{mI}=0.007$ кг/м³.

Значно більший вплив зовнішнього масо-і теплообміну на часи повного

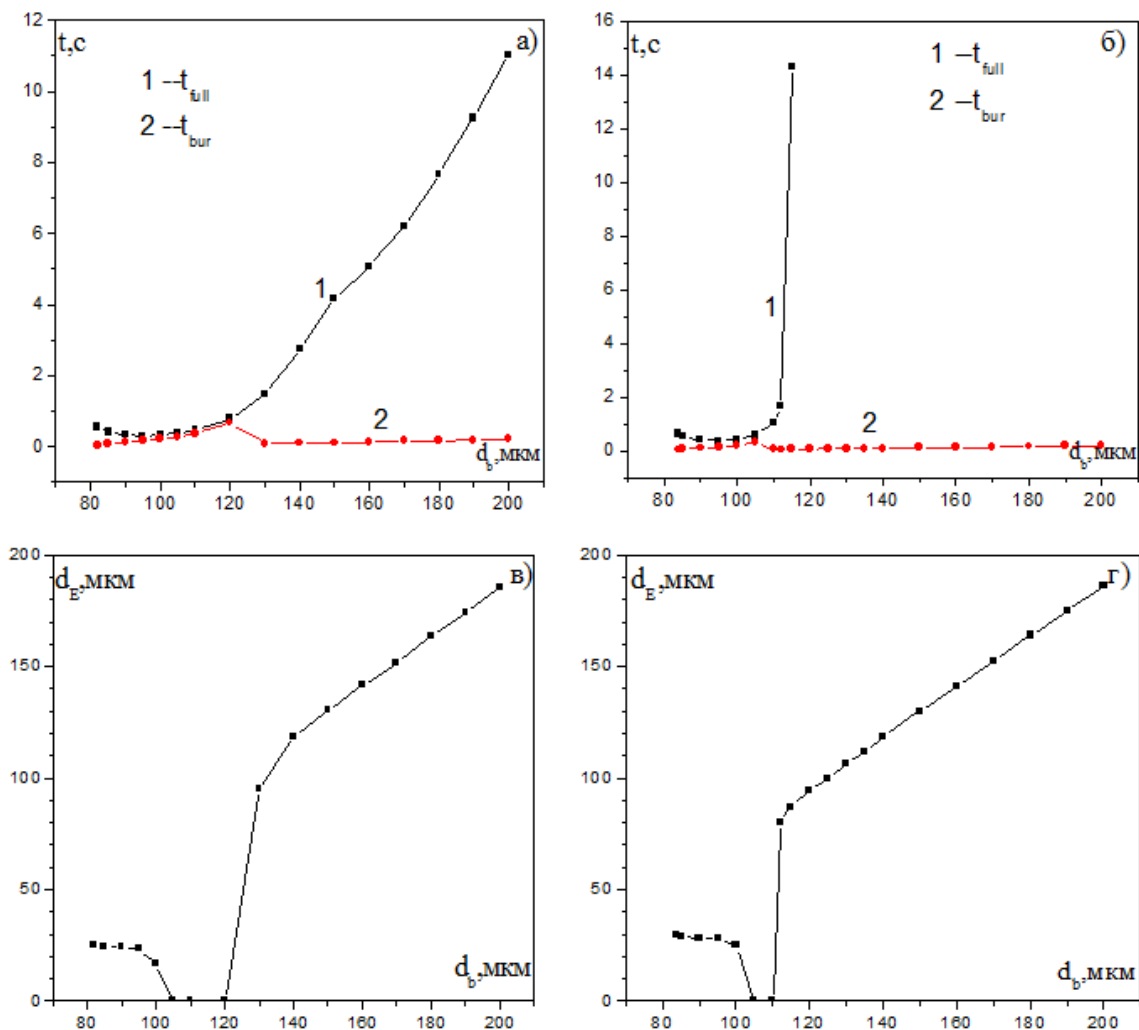


Рис.3. Залежність часу горіння t_{bur} , часу повного перетворення t_{full} і критичного діаметра d_E , що характеризує згасання частинок, від їх початкового діаметра. $T_{g\infty} = 1250$ К. а, в) – з урахуванням зовнішнього тепломасообміну; б, г) – без врахування.

перетворення частинок і критичний діаметр, що визначає їх згасання.

На рис.3 порівнюються час горіння і час повного перетворення (згорання) частинок для випадків відкритих і закритих газозависів, а також залежності критичного діаметра частинок при згасанні від їх початкового діаметра.

Видно, що існує така область початкових діаметрів частинок і, відповідно, масових концентрацій, за яких газозависи згоряють практично повністю. У цьому інтервалі діаметрів часи горіння та повного перетворення частинок практично збігаються. Для зазначених інтервалів початкових діаметрів момент згасання частинок є виродженим. На залежностях $dT/dt(t)$ мінімум, що характеризує згасання [7], слабо виражений. Відповідно на залежностях $d(t)$ відсутній характерний злам, що визначає стрибкоподібний перехід хімічних реакцій до низькотемпературного режиму протікання. При вироджених режимах згасання спостерігаються малі часи доокислення частинок (практично до нуля).

Тривалість часу повного перетворення частинок за таких режимів є мінімальним. Подальше збільшення початкового діаметра призводить до зростання критичного діаметра, який характеризує згасання (рис.3, г), зменшення часу горіння і істотного зростання часу повного перетворення. Ці явища пов'язані зі зменшенням концентрації кисню в об'ємі газозавису, і, отже, на поверхні частинки, зі зростанням масової концентрації палива. В умовах нестачі кисню частинки горять недовго і згасають при великих діаметрах. Надалі починається тривала стадія доокислення у кінетичному режимі, що призводить до зростання часу повного перетворення.

На залежностях часу повного перетворення частинок від початкового діаметра (відповідно масової концентрації (рис.4)) спостерігається мінімум, який пояснюється зростанням тепловтрат молекулярно-конвективним шляхом зі зменшенням діаметра (ліва частина залежності $t_{full}(d_b)$). Стадія доокислення частинок, розміри яких лежать поблизу критичного діаметра займання (початок інтервалу d_b [7]), протікає у глибоко кінетичному режимі. Отже, низькотемпературний тепловий режим частинок та його тривалість t_{ox} визначаються переважно теплообміном з газом. Зі зменшенням діаметра ростуть тепловтрати від частинок, що призводить до збільшення часу повного перетворення в області малих розмірів (масових концентрацій) частинок.

Для закритих газозависів спостерігається різке збільшення часу повного перетворення зі зростанням масової концентрації палива (рис.4 а, крива 1). Видно, що існує така гранична масова концентрація і, відповідно, граничний великий діаметр частинки, вище яких повного згорання закритих газозависів не відбувається. Для відкритих газозависів (рис.4а, крива 2) існують, хоча і тривалі, але кінцеві часи повного перетворення частинок для всієї області розглянутих масових концентрацій. Різке збільшення t_{full} у відсутності зовнішнього масообміну пов'язане з вигоранням кисню в об'ємі газозавису на стадії займання і згасанням, в результаті цього, хімічних реакцій на поверхні частинки.

Із рис.4 б випливає, що для відкритих газозависів область масових концентрацій, де спостерігається повне перетворення частинок, розширюється у бік великих значень. Діаметри частинок, що характеризують згасання газозависів, з

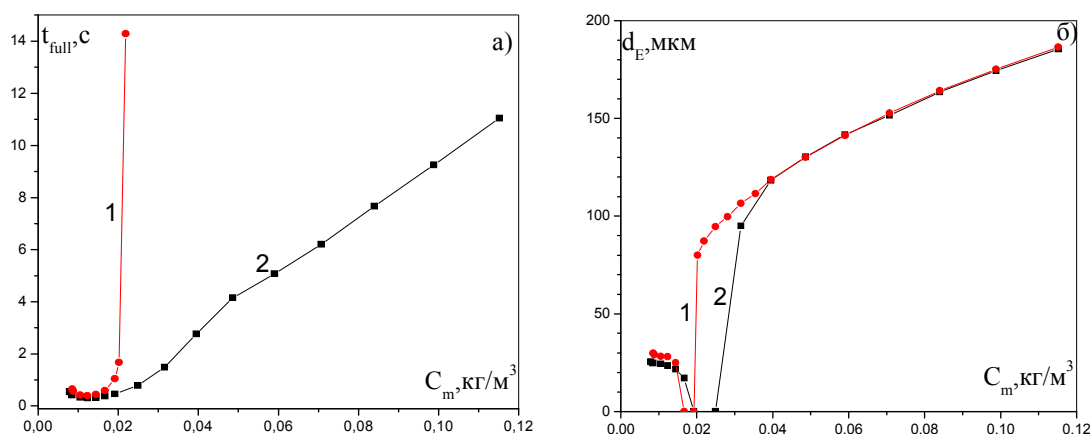


Рис.4. Залежність часу повного перетворення і критичного діаметра d_E від масової концентрації палива в газозавісі при $T_{g\infty} = 1250$ К. 1 – без урахування зовнішнього тепломасообміну; 2 – з урахуванням.

урахуванням зовнішнього масопереносу менше в результаті більшого надходження кисню.

У разі підвищення температури навколишнього газу до $T_{g\infty} = 1500$ К інтервал масових концентрацій, у якому спостерігається повне перетворення частинок палива, розширюється майже 2 рази. У цьому інтервалі часи t_{bur} і t_{full} практично збігаються. Значення граничних концентрацій, вище яких займання закритих газозавісів не відбувається, для випадків $T_{g\infty} = 1250$ і 1500 К відрізняються незначно.

Висновки. Таким чином, внаслідок проведених досліджень доведено значний вплив зовнішнього тепломасообміну на характеристики горіння і згасання газозавісів. Встановлено існування верхньої межі за концентраціями палива та діаметрами частинок, за яких не спостерігається повного згорання газозавісів в умовах відсутності зовнішнього масообміну. Знайдено, що для відкритих газозавісів інтервал масових концентрацій, за яких спостерігається найбільш повне згорання частинок, розширюється майже в 2 рази в бік більших значень концентрацій.

Література

1. Liu T., Wang N., Sun R., Cai Z., Tian W. and Jia R. Flame propagation and CO/CO₂ generation characteristics of lignite dust explosion in horizontal pipeline// International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2021. – Vol.16. – P. 1–7.
2. Moiseeva K. M., Krainov A. Yu. and Kantarbaeva A. Numerical determination of the combustion rate of a gas suspension of coal dust in a propane-air mixture//Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2057. – P.012065 .
3. Shi Xueqiang Numerical simulation on response characteristics of coal ignition under the disturbance of fluctuating heat// Combust. Flame. – 2021. – Vol. 237. – P. 111870.
4. Shi Xueqiang Effects of thermal boundary conditions on spontaneous combustion of coal under temperature-programmed conditions // Fuel. – 2021. – Vol. 295. – P. 120591.
5. Moiseeva K. M., Krainov A. Yu., Goloskokov S. I., Sazonov M. S., Lukashov O. Yu. Experimental and theoretical study of combustion of a coal dust particle–air mixture in a

- closed spherical volume // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2023. – Vol. 59, №4. – P.479 – 487.
6. *Lei Ch., Shi X., Jiang L., Deng C., Nian J., Gao Ya* Study on the effect of external air supply and temperature control on coal spontaneous combustion characteristics // Sustainability. – 2023. – № 10. – P. 8286.
 7. *Орловська С.Г.* Вплив колективного ефекту на характеристики високотемпературного тепломасообміну сукупностей поруватих вуглецевих частинок // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – Т.12, №2. – С. 490 - 499.
 8. *Orlovskaya S.G., Kalinchak V.V., Zuy O.N., Mandel O.V., Kachan S.V.* Heat and mass transfer and critical phenomena in the gas mixtures of carbon particles // Ukr. J. Phys. – 2011. – Т.56, №12. – С.1305-1311.
 9. Основы практической теории горения / Под ред. *В.В.Померанцева.* - Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 312с.
 10. *Головина Е.С.* Високотемпературное горение и газификация углерода. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 173 с.
 11. *Орловская С.Г., Зуй О.Н., Лисьянская М.В.* Воспламенение и горение газозвесей углеродных частиц при различных температурах // Промышленная теплотехника. – 2017. – Т. 39, № 5. – С. 97-102.

Orlovskaya S.G.

Study of the influence of external heat and mass exchange on the features of combustion and extinction of gas suspensions of carbon particles

SUMMARY

In the work, the regularities of the influence of heat and mass exchange of gas suspensions of carbon particles with the external gas environment on the processes of ignition, burning and quenching at different mass concentrations of carbon fuel are studied. A monodisperse gas suspension of carbon particles located in a gas heated to a high temperature, which contains an oxidant, is considered. As a result of the conducted physical and mathematical modeling, the following characteristics of high-temperature processes were determined: induction period, burning time and time of complete transformation of particles, critical parameters of ignition and extinction of particles. The influence on these characteristics of the initial particle diameter, mass concentration and temperature of the surrounding gas was analyzed. It was found that the external heat and mass exchange has a slight effect on the induction period and critical parameters of the ignition of gas suspensions, but it has a sufficiently strong effect on the characteristics of the combustion and extinguishing processes. The existence of an upper limit for fuel concentrations and particle diameters at which complete combustion of gas suspensions is not observed in the absence of external mass transfer is proved. Ranges of mass concentrations were found for which complete conversion of carbon fuel burning in the form of gas suspensions is carried out. It is shown that for open gas suspensions, the range of mass concentrations, where complete transformation of particles is observed, expands to the side of large values. The diameters of the particles characterizing the quenching of gas suspensions, taking into account the external mass transfer, are smaller, as a result of a greater supply of oxygen to the volume of the gas suspension.

Key words: *heat and mass transfer, ignition, combustion, extinction, carbon particles, gas suspensions.*