

УДК 662.6

ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТВЕРДОГО ПАЛИВА

Чмель В.М.¹, канд. тех. наук., Новікова І.П.²

¹ Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, chmel.valerii@gmail.com, <http://orcid.org/10000-0003-1394-7239>

² Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, novikovaines@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9612-286X>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2022.10>

У роботі наведено обґрунтування кінетичних особливостей палива: температури самозаймання і періоду індукції, методика і результати їх експериментального визначення для твердих викопних палив та відходів біомаси з метою використання як альтернативного палива.

The work provides the justification of the kinetic features of the fuel: self-ignition temperature and induction period, the method and results of their experimental determination for solid fossil fuels and biomass waste for the purpose of use as an alternative fuel.

Бібл. 10, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: тверде паливо, самозаймання, температура, період індукції.

t – температура, °C;

$t_{\text{гор}}$ – температура горіння, °C;

$t_{\text{сз}}$ – температура самозаймання, °C;

$t_{\text{ок}}$ – температура окислювача, °C;

τ – час, с;

W^p – робоча вологість палива, %;

A^p – робоча зольність палива, %;

V^a – леткі речовини в аналітичному стані палива, %;

Q_n^p – нижча робоча теплота згоряння палива, ккал/кг;

S – довжина стрічки, мм;

x – розмір частки, мм;

m – маса наважки, г;

A_{pp} – критерій Ареніуса;

E – енергія активації;

R – універсальна газова постійна;

T – температура горіння вугілля, К;

T_a – температура палива, К;

θ – відносна температура палива.

Вступ

При спалюванні палива швидкість реакції горіння, незалежно від механізму протікання процесу – тепло-кінетичного або ланцюгове-кінетичного, залежить від кінетичних особливостей палива.

Процес горіння складається з процесу займання палива – доведення його до температури самозаймання, яка є однією із важливих складових кінетичних особливостей палива і необхідна для досягнення енергії активації реакції горіння та забезпечує його займання і подальше горіння.

Займання палива відбувається не одразу – а через деякий період, під час якого відбувається накопичування енергії активації: теплоти або активних центрів залежно від механізму протікання процесу – тепло-кінетичного або ланцюгове-кінетичного, достатньої для подолання потенційного бар'єру. При цьому період досягнення температури самозаймання є періодом індукції даної

реакційноздатної системи: для самозаймання або часом запалювання при запалюванні.

Існують технології спалювання, в яких самозаймання палива є однією із головних складових процесу горіння. Вони забезпечують протікання процесу горіння палива при контакті з окислювачем в режимі самозаймання, при якому швидкість реакції горіння, відповідно за законом Ареніуса, сягає безкінечності [1-4]. Незалежно від механізму згоряння палива, самозаймання досягається підвищенням його температури шляхом підігріву.

До цих технологій можна віднести метод термохімічної обробки. Він полягає в тому, що за рахунок тепла продуктів згоряння невеликої частки самого палива або додаткового палива (витрата палива складає 1...6 % від загальної його кількості) підвищується реакційна здатність основного палива, доведенням його до температури самозаймання[1]. При цьому через де-

який час – період індукції, внаслідок розвитку реакції окислювання і виділення завдяки їй додаткового тепла – паливо при контакті з окислювачем займається і горить в режимі самозаймання. Температура при якій починається процес горіння – температура самозаймання.

Температура самозаймання та період індукції можуть бути визначені для палива як в шарі, так і в потоці окислювача.

Метод і методика досліджень. Методика визначення температури самозаймання та періоду індукції твердого палива в шарі, створена авторами, включає наступне:

- нагрів окислювача до заданої температури;
- подача твердого палива в середовище нагрітого окислювача;
- безперервний вимір температур окислювача та палива і їх реєстрація в часі;
- визначення при займанні палива його температури та проміжку часу з моменту подачі палива до його займання.

Результати досліджень. Процес самозаймання згідно методики (по результатам виміру температур окислювача та твердого палива в часі) виглядає наступним чином (рис.1.).

Після подачі в окислювач твердого палива його температура підвищується. Підвищення температури відбувається внаслідок як кондуктивної теплопередачі, так і внаслідок розвитку реакції окислення, яка може протікати за різним механізмом.

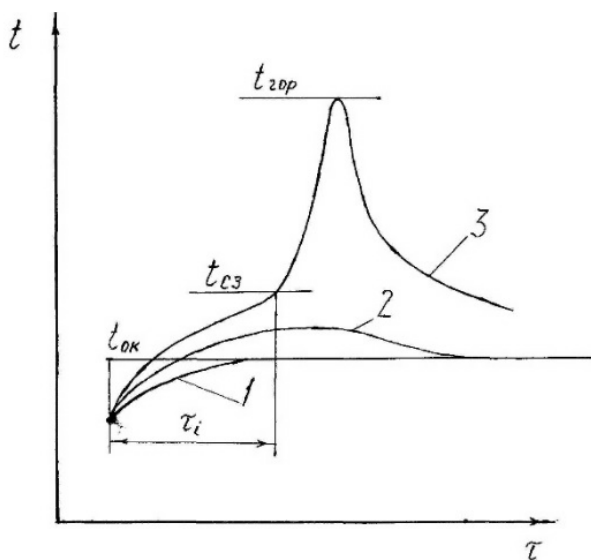


Рис. 1. Діаграма процесу самозаймання твердого палива

І з часом може досягає температури окислювача. Залежно від розвитку реакції окислення температура твердого палива може досягти тільки температури окислювача – 1 або її перевищити, але при цьому може не відбутись самозаймання палива – 2. Самозаймання палива відбувається тільки після досягнення температури самозаймання, внаслідок чого починається бурхливий розвиток окислення і паливо займається – 3. Далі відбувається процес горіння палива. На кривій 3 нижча точка перегину кривої зміни температури палива відповідає температурі самозаймання. Максимум кривої – відповідає температурі горіння.

Час, за який паливо нагрівається від початкової до температури самозаймання є періодом індукції. Так як температура самозаймання не є сталою величиною (залежить від тепломасообміну з оточуючим простором), доцільно її вивчати для умов безкінечності, що відповідає відсутності впливу теплоти, яка виділяється при згорянні палива, на температуру оточуючого окислювача.

Згідно цьому була створена установка для визначення температури самозаймання та періоду індукції твердого палива в шарі (Рис.2).

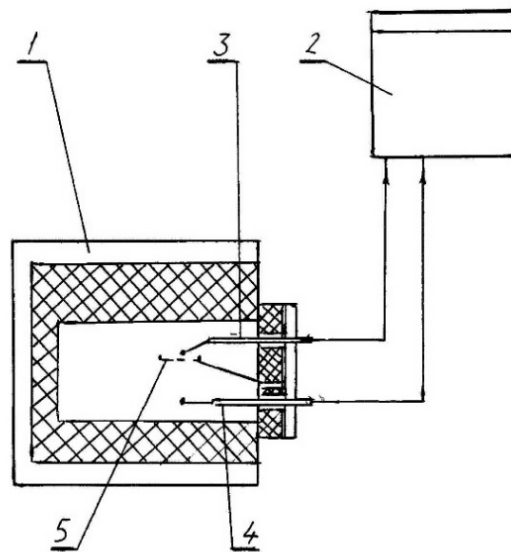


Рис. 2. Установка для визначення температури самозаймання та періоду індукції твердого палива:

- 1 – піч з електричним підігрівом електричним підігрівом; 2 – двоканалний потенціометр КСП-4; 3, 4 – термопары; 5 – тримач твердого палива

В склад установки входять: піч з електричним підігрівом – 1, дві мало інерційні термопари 3 та 4, тримач твердого палива 5 та двоканальний потенціометр КСП-4 для реєстрації температур окислювача та палива 2. В якості окислювача використовується повітря, яке знаходиться в печі і може нагріватись до температури 950°C.

На внутрішньому боці дверцят встановлені тримач твердого палива 5 та обидві термопари.

Термопари виконані з хромель-алюмелевого дроту діаметром 0,1 мм. Одна термopapa - палива в шарі 4 вимірює температуру окислювача в середині печі, друга – 3, виконана пружною і під час дослідів вільно притискається до твердого палива, розташованого на тримачі, і вимірює його температуру.

Визначення температури самозаймання на установці здійснюється наступним чином. Задаються температурою окислювача і нагрівають піч до заданої температури. Після встановлення сталої температури окислювача на тримач палива подається навіска (або окрема частинка) твердого палива.

Кількість палива вибирається з розрахунку, що після його згоряння температура в середині печі не підвищується (прилад не реєструє зміни температури).

В цьому внутрішній простір печі виступає до навіски твердого палива як безкінечний.

Потенціометр реєструє на діаграмній стрічці зміну температури палива та окислювача в часі. Після вигорання палива по діаграмній стрічці згідно методики визначають температуру самозаймання (та період індукції).

При проведенні дослідів по визначенню температури самозаймання і періоду індукції твердого палива в шарі використовувались такі викопні палива, як антрацит та кам'яне вугілля, а також відходи біомаси, які мають дрібнодисперсну структуру і можуть бути

застосовані в якості палива для безпосереднього спалювання паликовими пристроями. Це лузга гречки та проса, використання яких, як палива, може значно поліпшити паливно-енергетичний баланс підприємств по переробці продуктів сільського господарства.

В табл. 1. наведені характеристики вказаних палив, отримані в результаті технічного аналізу[5]. Паливо відрізняється між собою ступеню метаморфізму, вмістом летких та мінеральної частки, що дозволить визначити їх вплив на температуру самозаймання та період індукції.

Досліди проводились згідно розробленої методики на експериментальній установці (Рис.2). На рис. 3 та 4 наведені фрагменти стрічок прилада КСП-4, на яких показані зміни температур окислювача – 1 та твердого палива – 2. Швидкість руху стрічки 2400 мм/год, а час переключення термopap, які вимірюють температури окислювача $t_{ок}$ та твердого палива t_n дорівнює 1сек.

На рис. 3а дослід з лузгою проса, а на рис.3б дослід з кам'яним вугіллям. Вугілля мало розмір часток 0,1 мм, а навіски обох видів палив були $m=0,15$ г.

Температура окислювача при цьому була значно нижча температури самозаймання: для лузги проса 256 °С, для вугілля 500 °С.

Як бачимо, при недостатній температурі окислювача (рис. 3) паливо нагрівається, а потім відбувається його повільне окислення – піроліз, під час якого температура палива стала і не досягає температури самозаймання $t_{сз}$. Це спостерігається як для просяної лузги (рис.3а) так і для кам'яного вугілля (рис. 3б).

Зовсім інший характер зміни температури палива (рис. 4) при температурі 610 °С окислювача. Як бачимо, процес займання лузги проса відбувається наступним чином. Після розігріву часток палива внаслідок реакції окислення і досягнення ними температур самозаймання

Таблиця 1. Результати технічного аналізу різних твердих палив

№ з/п	Вид палива	W^p , %	A^p , %	V^a , %	Q_n^p ккал/кг
1	Кам'яне вугілля	1,457	44,97	21,95	4050
2	Антрацитовий штиб - АШ	3,11	30,32	6,82	4160
3	Березові дрова	8,68	1-2	80-87	2990
4	Лузга гречки	7,47	1,5	73,86	4070
5	Лузга проса	9,63	9,43	70,61	3859
6	Лузга вівса	8,71	4,9	76,21	4128
7	Костриця льону	9,67	2,21	71,41	-
8	Папір газетний	6,52	6,09	72,49	4430
9	Торф	35,7	23,2	42,2	3450

вони займаються. На кривій зміни температури палива видно перегин, відповідно температурі самозаймання t_{cz} .

В табл. 2 наведені температури самозаймання визначені під час дослідів.

Як видно, температури самозаймання палив значно відрізняються. Це можна пояснити вмістом летючих та ступеню метаморфізму палива.

Так, антрацит, який має найбільшу ступінь метаморфізму і найменшу кількість летючих, відповідно, і являє собою майже чистий вуглець, має найвищу температуру самозаймання [6].

В той же час, кам'яне вугілля, яке має меншу ступінь метаморфізму, займається при нижчій температурі. А обидва види лузги, які зовсім не вуглефіковані, займаються при найнижчій температурі. Це в деякій мірі підтверджується і даними наведеними в [7].

Під час дослідів вивчався вплив температури окислювача на самозаймання палива. З рис. 5а видно, що в діапазоні температур від 500°C до 700°C (маса навіски 0,15г., фракція 0,1 мм) температура самозаймання

кам'яного вугілля практично стала і не залежить від температури окислювача. В той же час при температурах окислювача нижчих 500°C самозаймання кам'яного вугілля не відбувається.

На температуру самозаймання також не впливає розмір часток вугілля (рис. 5б). При сталій температурі окислювача ($t_{ок} = 690^\circ\text{C}$), при зміні розміру часток вугілля від 0,1 мм до 5,5 мм температура самозаймання також була стала і становила 608 °C.

Отримані результати входять в протиріччя з наведеним в [8], де відмічається, що температура самозаймання залежить від багатьох факторів, в тому числі і наведених.

Вивчення впливу температури окислювача та маси палива на температуру самозаймання було додатково проведено на відходах біомаси – льняній костриці.

Як, видно, з рис. 6 б температура самозаймання була стала при зміні температури окислювача в межах 450...550 °C, розміру часток 0,1...0,6 мм та маси 0,05...0,40 г і досягала величини 480...500°C.

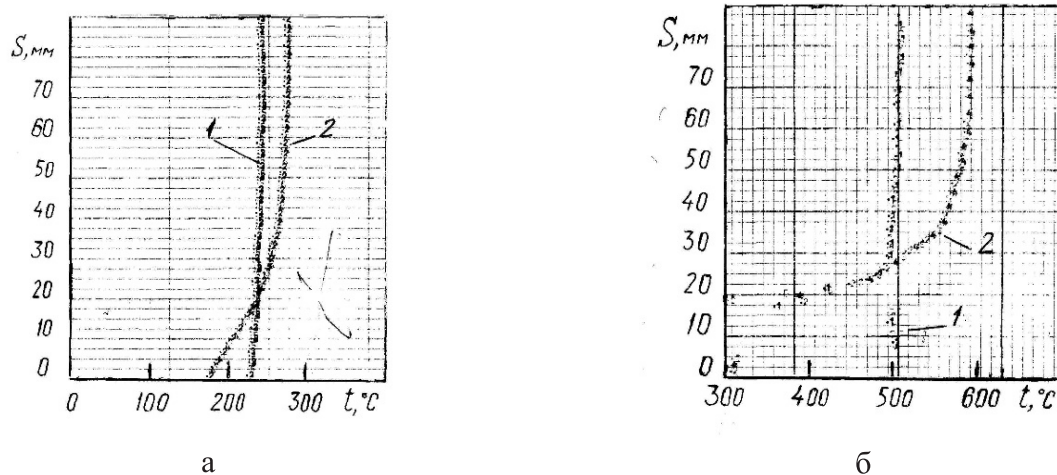


Рис. 3. Діаграма зміни температури: а – лузги проса; б – кам'яного вугілля

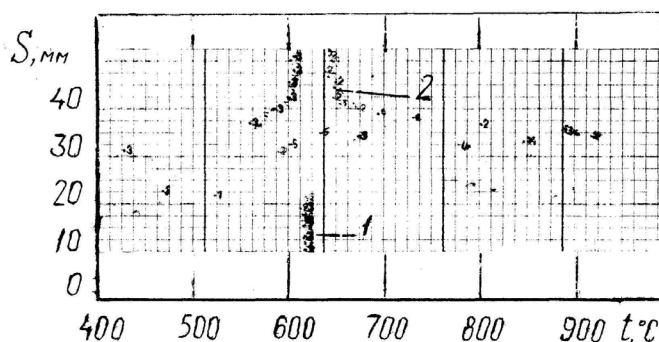


Рис. 4. Діаграма зміни температури лузги проса при самозайманні

Наведене дозволяє зробити висновок, що в умовах безмежного простору, а він моделюється в дослідній установці, при відсутності струменевої течії температура самозаймання твердого палива в шарі є сталою величиною і не залежить від розміру його часток, їх кількості в шарі та температури окислювача.

Згідно з цим і в умовах реального використання палива також буде відсутня залежність температури самозаймання від вказаних величин.

В решті-решт, температура самозаймання залежить тільки від умов теплообміну (відповідно й від аеродинаміки), а абсолютна величина температури самозаймання для безмежного простору є константа, а уже потім при наявності теплообміну (з градієнтами швидкості) приймає те або інше значення.

Період індукції істотно залежить від температури окислювача. Так, на рис.7 наведена визначена під час дослідів залежність періоду індукції кам'яного вугілля при самозайманні від тем при самозайманні від температури окислювача при сталій масі навіски палива 0,15 г

та фракційного складу вугілля, частки якого були менше або рівними 0,1 мм, період індукції при підвищенні температури – зменшується.

Це пов'язано з більш інтенсивною передачею тепла часткам вугілля внаслідок збільшення градієнта температур і з прискоренням розвитком окислювальної реакції. І це є головне і відповідає закону Ареніуса.

Слід зазначити, що в межах проведених дослідів період індукції був найбільшим – до 52 с при температурі окислювача близький 500°C. При температурах нижче 500°C самозаймання вугілля не відбувається.

Період індукції, як показали проведені досліди, не залежить від розміру часток. Це може бути пояснене тільки тим, що швидкість термічної деструкції палива близька до швидкості його нагріву. Час вигорання часток вугілля, навпаки, залежить від розміру його часток.

На підставі обробки результатів проведених дослідів по визначенню самозаймання вугілля та рішенням системи рівнянь нестационарного тепло-масообміну при наявності внутрішніх джерел та стоків тепла та маси,

Таблиця 2. Результати дослідів із визначення температури самозаймання палива

№	Вид палива	Температура самозаймання, °C
1	Деревина (береза)	290... 350
2	Лузга гречки	310...340
3	Лузга проса	315...340
4	Лузга вівса	315...345
5	Костриця льону	480...500
6	Папір газетний	320...340
7	Торф	250...270
8	Кам'яне вугілля	500...610
9	Антрацит	790...810

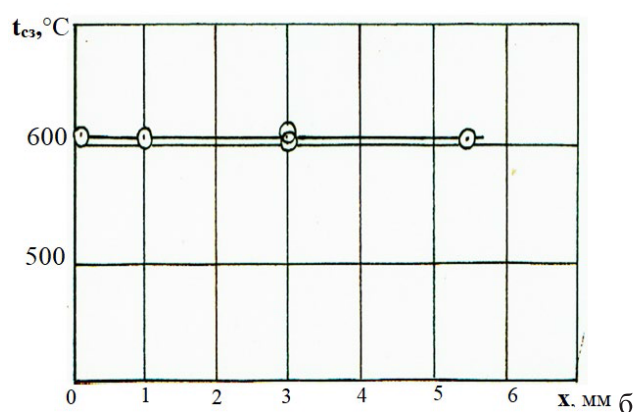
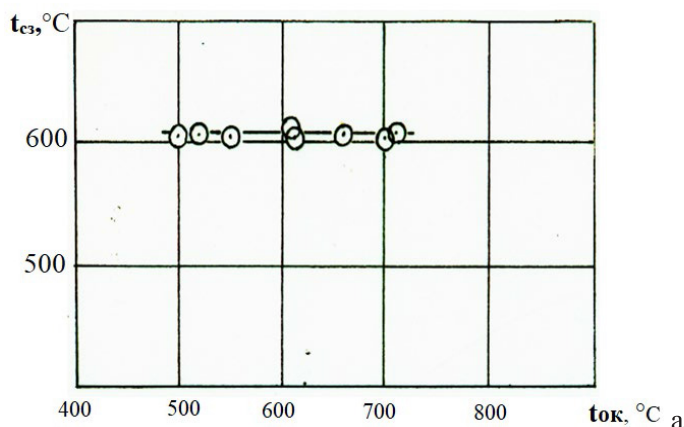


Рис. 5. Залежність температури самозаймання кам'яного вугілля:

а – від температури окислювача; б – розміру частки

яке наведено в [8,9] була отримана формула для визначення температури самозаймання:

$$\theta = 0,36^{0,04} \cdot e^{A_{pp}},$$

де A_{pp} - критерій Ареніуса: $A_{pp} = \frac{E}{RT_a}$,

E – енергія активації; T_a – температура горіння вугілля.

Формула придатна для різного вугілля кам'яного, антрациту та інших.

На підставі обробки результатів дослідів з врахуванням рішень роботи [10] була отримана формула, яка дозволяє визначити період індукції:

$$\tau = 0,48 \cdot 10^5 \cdot \exp 1,15 \frac{A_{pp}}{\theta},$$

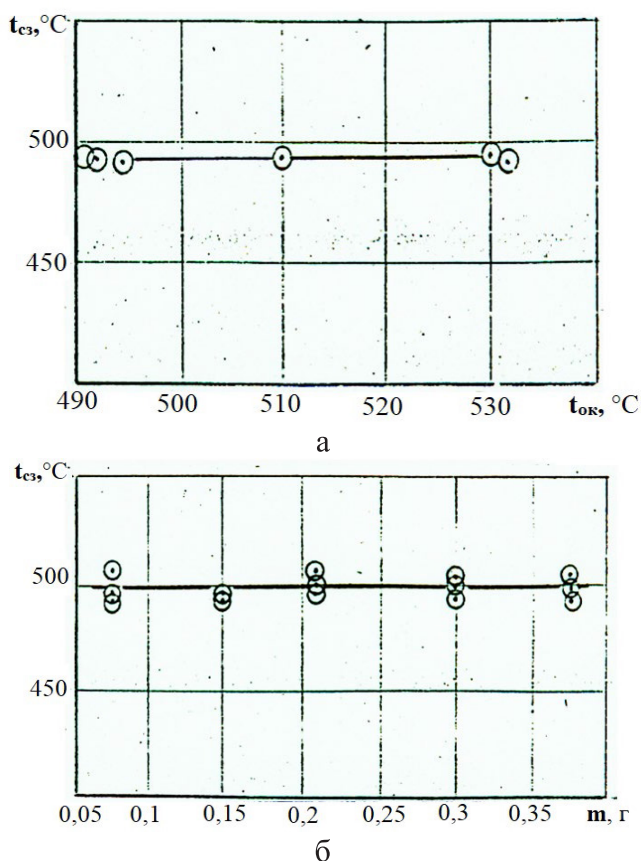


Рис. 6. Залежність температури самозаймання льняної кистриці:

а – від температури окислювача; б – маси наважки

де $\theta = \frac{T_a}{T_o}$ – відносна температура палива;

T_o – температура палива.

Слід відмітити, що при організації процесу спалювання палив необхідно враховувати період індукції. І, в залежності від його значення, дещо йти в бік збільшення температури вугілля.

Висновки. За розробленою методикою створено установку для визначення температури самозаймання та періоду індукції твердого палива в шарі.

Експериментально визначені температура самозаймання та період індукції для твердого палива.

Показана залежність температури самозаймання від ступеню метаморфозу та летких. При збільшенні ступеню метаморфізму та зменшенню летких в твердому паливі температура самозаймання зростає. Так у лузги проса деревини температура самозаймання від 256 °C, а у кам'яного вугілля до 500 °C.

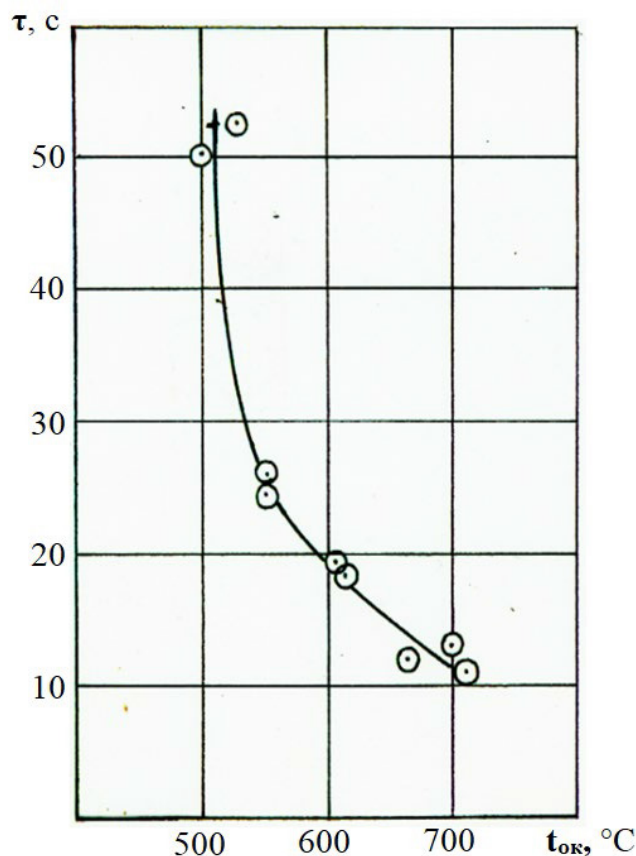


Рис. 7. Залежність періоду індукції кам'яного вугілля від температур окислювача при самозайманні в шарі (маса навіски 0,15 г; фракція 0,1 мм)

Показано, що період індукції залежить від початкової температури процесу та вмісту летких в паливі.

Отримана формула для визначення температури самозаймання.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Чмель В.Н., Дунаевская Н.И., Огий В.Н., Барбышев Б.Н. Повышение эффективности сжигания низкосортных топлив методом термохимической обработки // Известия вузов. Энергетика. – 1985. – № 3. – С. 96–100.
2. Чмель В.Н., Новикова И.П. Сжигание топлива по методу термохимической подготовки // Дисперсні системи. XX наукова конференція країн СНД, 23 – 27 вересня 2002р. Одеса, Україна. – Одеса: Астропринт, 2002. – С. 276–277.
3. Кондратьев Е.Н., Опятюк В.В., Чмель В.Н., Новикова И.П. Использование отработанных машинномоторных масел в качестве топлива промышленных котлоагрегатов // Дисперсні системи. XX наукова конференція країн СНД, 23 – 27 вересня 2002р. Одеса, Україна. – Одеса: Астропринт, 2002. – С. 142–143.
4. Патент України 135494, МПК F23D 17/00. Пальниковий пристрій / В.М. Чмель, І.П. Новікова. – Заявл. 31.10.2018; Опубл. 10.07.2019, бюл. № 13/2.
5. Чмель В.М., Новікова І.П. Дослідження паливних характеристик відходів біомаси // Відновлювана енергетика. – 2006. – №4(7) –с.107–113.
6. Бабий В.И., Мирошниченко В.А. Оптический пирометр для изучения температуры мелких частиц пылевидного топлива при их выгорании // В кн.: Горение твердого топлива. – Часть III. Новосибирск, Наука, 1974. – с.14–18.
7. Яворский И.А. Физико-химические основы горения твердых ископаемых топлив и графитов. – Наука. Новосибирск, 1973. –254с.
8. Кнорре Г.Ф., Арефьев К.М., Блох А.Г. и др. Теория топочных процессов. – М.-Л., Энергия, 1966. – 491 с.
9. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. – М., Изд-во МГУ, 1957. – 442 с.
10. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Е., Кононович М.Н., Рундыгин Ю.А., Шагалова С.А., Шестопалов С.А. Основы практической теории горения. – Л., Энергоиздат, 1986. –312 с.

DETERMINATION OF KINETIC CHARACTERISTICS OF SOLID FUEL

Chmel V.N., Novikova I.P

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Science of Ukraine, 2a, Marii Kapnist str., Kyiv, Ukraine, 03057

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2022.10>

The combustion process begins with the ignition of the fuel - bringing it to the auto-ignition temperature, which is one of the important components of the kinetic characteristics of the fuel.

Fuel ignition does not occur immediately - but after a certain period, during which activation energy is accumulated: heat or active centers, depending on the mechanism of the process - thermal-kinetic or chain-kinetic, sufficient to overcome the potential barrier. At the same time, the period of reaching the self-ignition temperature is the induction period of this reactive system: for self-ignition or the ignition time during ignition.

The purpose of the work is to substantiate the kinetic characteristics of the fuel: self-ignition temperature and induction period, methods of their experimental determination for solid fossil fuels and biomass waste.

According to the methodology, an installation was created for the experimental determination of the self-ignition temperature and the induction period of solid fuel in the layer.

Studies of such fuels as anthracite, hard coal, buckwheat husk, millet, oats, flax husks, birch wood, peat, and paper showed the dependence of the self-ignition temperature on the degree of metamorphosis and volatiles. With an increase in the degree of metamorphism and a decrease in volatiles in solid fuel, the self-ignition temperature increases. However, the self-ignition temperature does not depend on the size of its particles, their number in the layer and the temperature of the oxidizer.

The above allows us to conclude that the self-ignition temperature depends only on the conditions of heat exchange (accordingly, on aerodynamics), and the absolute value of the auto-ignition temperature for an infinite space, in the absence of a jet stream, is a constant value, and only then, in the presence of heat exchange (with velocity gradients), takes one or another value.

It was found that the induction period depends only on the initial temperature of the process, the induction period

decreases with increasing temperature. This is due to the more intensive transfer of heat to the fuel particles due to the increase in the temperature gradient and the acceleration of the development of the oxidation reaction.

The induction period, as shown by the conducted experiments, does not depend on the size of the particles. This can be explained only by the fact that the rate of thermal destruction of the fuel is close to the rate of its heating. The burning time of coal particles, on the contrary, depends on the size of its particles.

Expressions for determining the autoignition temperature and the induction period were obtained based on the processing of the results of the conducted experiments.

The results of the work can be used in combustion technologies, in which self-ignition of fuel is one of the main components of the process - it ensures combustion in the self-ignition mode of fuel when in contact with an oxidizer.

References 10, tables 2, figures 7.

Key words: solid fuel, self-ignition, temperature, induction period.

1. Chmel V.N., Dunaevskaya N.I., Ogiy V.N., Barbyshchev B.N. Povyshenie effektivnosti szhiganiya nizkosortnykh topliv metodom termohimicheskoy obrabotki [Improving the efficiency of burning low-grade fuels by the method of thermochemical treatment]. *Izvestiya vuzov. Energetika* [Izvestiya vuzov. Energy]. 1985. № 3. P. 96–100. (Rus.)

2. Chmel V.N., Novikova I.P. Szhiganie topliva po metodu termohimicheskoy podgotovki [Combustion of fuel according to the method of thermochemical preparation]. Dispersed systems. XX scientific conference of the CIS countries, Odesa, Ukraine, 2002. P. 276–277. (Rus.)

3. Kondratev E.N., Opyatyuk V.V., Chmel V.N., Novikova I.P. Ispolzovanie otrabotannykh mashinomotornykh masel v kachestve topliva promyshlennyykh kotloagregatov [Use of used engine oils as fuel for industrial boilers]. Dispersed systems. XX scientific conference of the CIS countries, Odesa, Ukraine, 2002. P. 142–143. (Rus.)

4. Chmel V.M., Novikova I.P. Palnykovyi prystrii [Burner device]. Patent of Ukraine, №135494, 2019. (Ukr.)

5. Chmel V.M., Novikova I.P. Doslidzhennia palyvnykh kharakterystyk vidkhodiv biomasy [Study of fuel characteristics of biomass waste]. *Vidnovliuvana Energetyka* [Renewable energy], 2006. №4(7). P.107–113. (Ukr.)

6. Babiy V.I., Miroshnichenko V.A. Opticheskii pirometr dlya izucheniya temperatury melkih chastits pyilevidnogo topliva pri ih vyigorianii [Optical pyrometer for studying the

temperature of small particles of pulverized fuel during their burnout]. Gorenje tverdogo topliva [Combustion of solid fuel]. Part III, Novosibirsk, Nauka [Science], 1974. P.14-18. (Rus.)

7. *Yavorskiy I.A.* Fiziko-himicheskie osnovyi gorennya tverdyih iskopaemyih topliv i grafitov [Physical and chemical bases of combustion of solid fossil fuels and graphites]. Novosibirsk, Nauka [Science], 1973. 254p. (Rus.)

8. *Knorre G.F., Arefev K.M., Bloh A.G. i dr.* Teoriya topochnyih protsessov [Theory of furnace processes]. Moscow-Leningrad, Energiya [Energy], 1966. 491 p. (Rus.)

9. *Hitrin L.N.* Fizika gorennya i vzryiva [Physics of combustion and explosion]. Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta [Publishing House of Moscow State University], 1957. 442p. (Rus.)

10. *Pomerantsev V.V., Arefev K.M., Ahmedov D.E., Kononovich M.N., Rundygin Yu.A., Shagalova S.A., Shestopalov S.A.* Osnovy prakticheskoy teorii gorennya [Fundamentals of the practical theory of combustion]. Leningrad, Energoizdat, 1986. 312p. (Rus.)

Отримано 21.07.2022

Received 21.07.2022