

References:

1. Kaminski D.A., Jesen M.K. Introduction to thermal and fluid engineering. Johg Willy Sons, Inc. Danvers Publ., 2005. 783 p.
2. Valueva E.P., Domoratskaya T.A. Otsenka teplogidravlicheskoj effektivnosti rekuperativnykh teploobmennyykh apparatov [Evaluation of the heat-hydraulic efficiency of recuperative heat exchangers]. *Teploenergetika – Heat power engineering*, Moscow, 2000, no. 3, pp. 43-48. (Rus.)
3. Klyuyev O.I. *Optimizatsiia roboti kozhukhotrubnogo teploobminnika shliakhom vplivu na gidrodinamiku potoku*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Optimization of heat exchanges job by influence on hydrodynamics of a flow. Cand. tech. sci. diss. thesis]. Kherson, 2006. 24 p. (Ukr.)
4. Lunyaka K.V., Klyuev O.I., Rusanov S.A. Stvorennia rivnomirnogo rozpodilu shvidkosti rukhu teplonosii v trubakh kozhukhotrubchastogo teploobminnika za dopomogoiu rozpodil'nikh vstavok. *Materiali Mizhn. nauk.-tehn. konf. «Transport, mekhanichna inzheneriia, ekspluatatsiia, materialoznavstvo» (ТМІЕМ-2017)* [Creation of a uniform distribution of the heat transfer velocity in the pipes of the shell and tubular heat exchanger with the help of distributive inserts. Proceedings of Int. Sci.-Techn. Conf. «Transport, mechanical engineering, operation, material sciences» (ТМІЕМ-2017)]. Kherson, 2017, pp. 35-36. (Ukr.)
5. Lunyaka K.V., Klyuev O.I., Rusanov S.A. Vpliv rozpodil'nikh vstavok v kozhukhotrubchastikh teploobminnikakh na velichinu rushiinoї sili protsesiv teploobminu. *Anotatsii IV Mizhn. nauk.-tehn. konf. «Holod v energetytsi i na transporty»* [Influence of distribution inserts in shell and tubular heat exchangers on the magnitude of the driving force of heat transfer processes. Abstracts of IV Int. Sci.-Techn. Conf. «Cold in energy and transport»]. Mykolaiv, 2017, p. 464. (Ukr.)

Рецензент: Б.В. Димо

канд. техн. наук, проф., НУК ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Стаття надійшла 15.03.2019

УДК 662.61

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181290

© Віннікова В.Г.¹, Холькін О.М.²

ПРО МЕХАНІЗМ ГОРІННЯ ТВЕРДОГО ПАЛИВА

Механізм горіння твердого палива являє собою сукупність різних зон горіння, що характеризують багатостадійний процес перетворення вихідного палива в кінцеві продукти згорання. Спостереження, здійснені візуально і фотографічним способом, показали, що в інтервалі тиску від 1 до 150 атм. поміж поверхнею горіння зразка, на якій відбувається газифікація конденсованої фази, та зоною максимальної температури існує ще одна зона, яка називається «темною зоною». У цій зоні тривають інтенсивні хімічні реакції, які завершують газифікацію конденсованої фази та постачають продукти горіння в факел полум'я. Результати дослідження показали, що максимальне тепловиділення відбувається в конденсованій фазі палива. Аналіз поглинальної здатності факела полум'я показав, що зона максимальної температури наближається до поверхні зразка палива, а відведення тепла з димогазових зон становить 5-10% від загальної кількості тепла, що виділяється в реакційній зоні зразка. У результаті досліджень встановлено, що провідну роль при горінні твердого палива грає конденсована фаза. При цьому можна змінювати не тільки швидкість горіння, а й її температурний профіль.

Ключові слова: горіння, тверде паливо, порох, конденсована фаза.

¹ канд. техн. наук, доцент, «Азовський морський інститут» НУ «ОМА», м. Маріуполь, expert-capital@yandex.ua

² д-р фіз.-мат. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, a.kholkin@gmail.com

Винникова В.Г., Холькин А.М. О механизме горения твердого топлива. Механизм горения твердого топлива представляет собой совокупность различных зон горения, характеризующих многостадийный процесс превращения исходного топлива в конечные продукты сгорания. Наблюдения, осуществленные визуально и фотографическими способами, показали, что в интервале давления от 1 до 150 атм. между поверхностью горения образца, на которой происходит газификация конденсированной фазы, и зоной максимальной температуры существует ещё одна зона, называемая «темной зоной». В этой зоне продолжаются интенсивные химические реакции, которые завершают газификацию конденсированной фазы и поставляют продукты горения в факел пламени. Результаты исследования показали, что максимальное тепловыделение происходит в конденсированной фазе топлива. Анализ поглощательной способности факела пламени показал, что зона максимальной температуры приближается к поверхности образца топлива, а отвод тепла из дымогазовой зоны составляет 5-10% от общего количества тепла, выделяющегося в реакционной зоне образца. Исследованиями установлено, что ведущую роль при горении твердого топлива играет конденсированная фаза. При этом можно изменять не только скорость горения, но и ее температурный профиль.

Ключевые слова: горение, твердое топливо, порох, конденсированная фаза.

V.G. Vinnikova, O.M. Kholkin. On the mechanism of solid fuel burning. The mechanism of solid fuels burning represents a combination of different burning zones characterizing the multistage process of the initial fuel transformation into final combustion products. Observations carried out visually and by means of photographic techniques have shown that over the pressure range 1 to 150 atm., there is so-called «dark zone» between the sample burning surface, on which the gasification of the condensed phase takes place, and maximum temperature zone. Intense chemical reactions keep taking place in this zone, completing the gasification of the condensed phase and supplying the products of combustion to the flame. The results of the study have shown that the maximum heat release occurs in the condensed phase of the fuel. Analysis of the flame-absorbing ability of the flame has shown that the zone of maximum temperature approaches the surface of the fuel sample, and the heat removal from the smoke and gas zone is 5-10% of the total heat released in the reaction zone of the sample. Studies have shown that the condensed phase plays a leading role in the burning of solid fuels. In this case, it is possible to change not only the burning rate, but its temperature dependence as well. From the data on the rate of thermal decomposition in the condensed phase of the gunpowder, it is known that the reaction rate increases sharply with increasing temperature. On the other hand, measurement made by thermocouple, moving together with the gasification surface shows that the temperature increases with increasing pressure. Consequently, with increasing pressure the intensity of the reaction in the condensed phase increases as well; therefore, the heat release in the condensed phase also increases with increasing pressure. Evaluation of the thermal effect in the initial stage of burning that takes place in the reaction layer of the condensed phase, makes it possible to suggest that in the overall balance of the heat used for heating the gunpowder in the burning process, specific amount of the heat, released in the reaction layer of the condensed phase of the gunpowder, increases with increasing pressure.

Keywords: burning, solid fuel, gunpowder, condensed phase.

Постановка проблеми. Види горіння, які зустрічаються в природі і в техніці, дуже різноманітні. Їх поділяють відповідно до фазового складу компонентів на три групи: 1) гомогенне горіння (всі компоненти, що беруть участь в горінні, знаходяться в газовій фазі); 2) гетерогенне горіння (частина компонентів знаходиться в твердій і рідкій фазах, а інша – в газоподібній фазі); 3) горіння вибухових речовин і твердих ракетних палив.

Стрімкий розвиток сучасної ракетної техніки ще більш активізував розвиток науки про горіння. Під механізмом горіння зазвичай розуміють досить велику сукупність зон горіння, які обумовлюють характерні закономірності процесу горіння палива. Розглянемо основні найбільш суттєві експериментальні факти і закономірності горіння балістичного пороху «Н».

Характерною особливістю горіння порохів є багатостадійний характер перетворення вихідної речовини в кінцеві продукти горіння.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Спостереження процесу горіння зразків пороху, вироблене візуально й фотографічним чином, показало, що в інтервалі тисків від 1 до 150 атм. є так звана «темна зона», яка розташована між поверхнею горіння, де відбувається газифікація конденсованої фази, й частиною факела полум'я, що яскраво світиться, – зоною максимальної температури. Ширина цієї темної зони залежить від тиску навколишнього середовища. При цьому конденсовану фазу пороху можна поділити на дві зони: зону прогріву і зону самої хімічної реакції. Спостереження показали [1], що в період газифікації конденсованої фази значна її частина піддається дробленню на частинки, тобто піддається диспергуванню.

Мета статті – визначення загального критерію, який встановлює, яка стадія горіння твердого палива є провідною: реакція в димогазовій або конденсованій фазі.

Виклад основного матеріалу. Характерною особливістю горіння конденсованих систем є багатостадійний характер перетворення початкової речовини в кінцеві продукти горіння. Конденсована фаза палива при цьому розділяється на дві зони: зону прогріву, де температура ще недостатня для початку хімічної реакції, і зону хімічної реакції, в якій відбувається інтенсивне тепловиділення і газифікація конденсованої фази. Чітке просторове розділення стадій, тобто зони реакції в конденсованій фазі, паро-димогазової зони та зони, що світиться, є досить умовним, проте є експериментальні можливості, здійснені в роботі [2], що дозволяють розділити зони та досліджувати їх окремо.

Здійснення режиму так званого безполум'яного горіння [1-2] є демонстрацією екзотермічного характеру реакцій в конденсованій фазі. Цей режим, наприклад, для нітрогліцеринового пороху можна здійснити при досить глибокому вакуумі (1-2 мм. рт. ст.), а також при температурі попереднього підігріву (110-115°C).

При цьому на поверхні зразка, де відбувається процес газифікації, розвивається температура близько 310°C, в той час як максимальна температура досягає 340°C. Це підвищення температури на 30°C в порівнянні з температурами, які досягаються в димогазовій зоні при кількох високих тисках, досить мало, тому відведенням тепла з димогазової фази до конденсованої можна знехтувати. Це дозволяє оцінити кількість тепла, що виділяється в одиниці маси конденсованої фази до моменту газифікації:

$$Q_k \cong C_1 (T_s - T_0) \cong 0,4 \frac{\text{кал}}{\text{град}} * 200 \cong 80 \text{кал}, \quad (1)$$

де C_1 – теплоємність конденсованої фази для нереагуючої маси.

За даними швидкості термічного розкладання конденсованої фази пороху [2-3] можна припустити, що залежність швидкості реакції від температури різко зростає з підвищенням температури, з іншого боку, в роботах П.Ф. Похила із співавторами [2] шляхом вимірювання за допомогою термопари, яка рухається разом з поверхнею газифікації, було показано, що температура цієї поверхні збільшується зі збільшенням тиску, тому інтенсивність реакцій в конденсованій фазі повинна зростати зі зростанням тиску. Таким чином збільшується питома вага тепла, що виділяється в реакційному шарі конденсованої фази, в загальному балансі тепла, яке надходить для нагріву пороху в процесі горіння. Звідси випливає, що відношення диспергованої маси до маси газифікації має зменшуватися зі збільшенням тиску.

Причина диспергування полягає в тому, що хімічна реакція, яка протікає в конденсованій фазі, не може протікати рівномірно по всій товщині реакційного шару, що обумовлено фізичною і хімічною неоднорідністю пороху, тому створюються центри, на яких і відбувається активний розвиток реакцій. Газові включення, які утворюються навколо цих центрів, призводять до порушення цілісності конденсованої фази і до утворення в подальшому димогазової зони в факелі полум'я. Основна маса частинок диспергування згорає в безпосередній близькості від поверхні газифікації. Диспергуванні частки в кінцевих продуктах горіння відсутні.

Температурний профіль зон горіння по висоті факела полум'я при різних тисках дозволяє отримати докладні відомості про механізм фізико-хімічних і теплофізичних процесів, що протікають під час горіння.

У роботах [1, 4] методом інфрачервоної пірометрії був отриманий температурний профіль полум'я пороху «Н». Результати роботи представлені на рисунку.

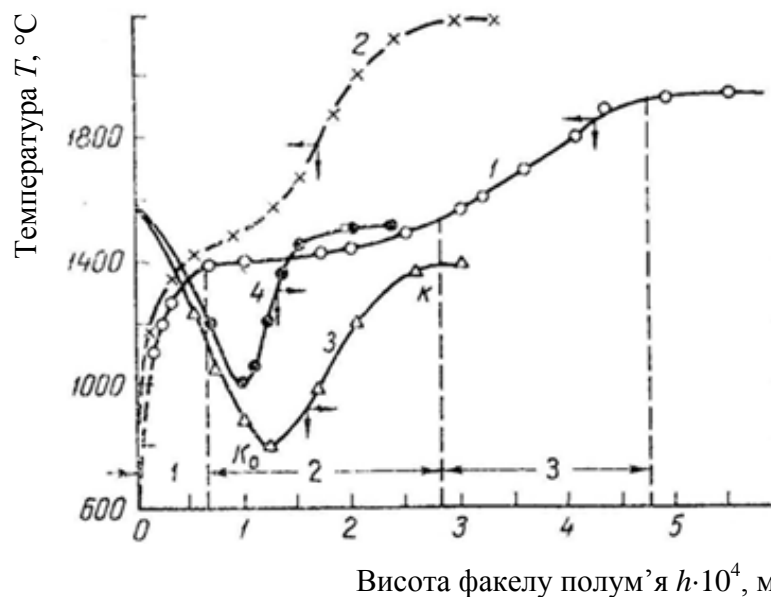


Рисунок – Залежність температури і поглинальної здатності по висоті факела полум'я нітрогліцеринового пороху «Н»; криві 1, 2 та 3, 4, відповідно, при 20 та 40 атм.

Поблизу поверхні заряду спостерігається швидкий підйом температури, обумовлений завершенням реакції розкладання диспергованої маси конденсованої фази, що збігається з результатами вимірювання прозорості факела полум'я.

У наступній зоні – «темній зоні» – спостерігається незначне зростання температури, вище якої (вже в третій зоні) існує значне збільшення температури, обумовлене екзотермічною реакцією з великою швидкістю тепловиділення. У цій зоні температура досягає максимального значення. Для температурних кривих характерна наявність плато, яке вироджується з підвищенням тиску в досить помітний перегин, який при більш високому тиску зникає зовсім, при цьому зона максимальної температури наближається до поверхні пороху.

Нормальне горіння характеризується сталими швидкостями переносу маси та енергії через реакційну зону і сталими градієнтами концентрації та температури. У рівнянні теплопровідності всі похідні за часом при цьому обертаються до нуля. Тепловий баланс подібної схеми горіння можна виразити таким рівнянням:

$$\lambda \frac{d^2T}{dx^2} - c\rho u \frac{dT}{dx} + q[T(x)] = 0. \quad (2)$$

Перший член рівняння являє собою швидкість зміни тепла в одиниці об'єму в будь-якій площині x полум'я, обумовлену теплопровідністю, другий – швидкість зміни тепла, обумовлену масовою швидкістю продуктів горіння, третій – швидкість тепловиділення в результаті хімічних реакцій. Похідні по x були визначені шляхом графічного диференціювання запису температурної кривої по висоті факела полум'я. Знаючи швидкість зміни тепла, обумовлену теплопровідністю і масовою швидкістю продуктів горіння, можна обчислити значення функції $q[T(x)]$ по висоті факела полум'я.

Використання термодинамічної методики в конденсованій фазі пороху і інфрачервоної піраметрії в димогазовій та в газовій зонах дозволило обробити профілі температури і розрахувати тепловиділення в наслідок хімічних реакцій в кожній зоні факела полум'я, а також підведення тепла з димогазової зони в конденсовану фазу в залежності від тиску [1-5].

З аналізу кривої $q[T(x)]$ випливає, що швидкість тепловиділення досягає свого першого максимуму в реакційному шарі конденсованої фази палива; другий максимум швидкості тепловиділення розташований на певній відстані від поверхні пороху і обумовлений інтенсивним розкладанням диспергованої маси палива. Значення функції зменшується і знову зростає, досягаючи третього максимуму в зоні максимальної температури факела полум'я.

Експериментальна оцінка значень градієнта температури та температури на поверхні зони газифікації палива дозволила розрахувати підведення тепла з димогазової фази факела полум'я в конденсовану фазу палива, яке становить 5-10% від загального тепла, що виділяється в реакційному шарі палива.

Висновки

1. Отримано загальний критерій, який визначає, що є провідною стадією горіння: реакція в димогазовій або конденсованій фазі палива.
2. При підвищенні початкової температури провідна роль переходить до конденсованої фази, так як швидкість горіння при високих температурах перевищує швидкість горіння димогазової суміші.
3. Я.Б. Зельдович [6] показав, що підвищення початкової температури може збільшити швидкість горіння не більше, ніж в $e \approx 2,7$ рази. В роботі показано, що підвищення початкової температури піроксілінованого порошку вище 40°C збільшує температурний коефіцієнт швидкості горіння приблизно в 7 разів при нормальному атмосферному тиску. Підвищення тиску так само веде до переходу провідної ролі до конденсованої фази.

Список використаних джерел:

1. Похил П.Ф. О механизме горения бездымных порохов / П.Ф. Похил // Физика взрыва. – М., 1953. – № 2 – С. 181-195.
2. Похил П.Ф. О механизме горения бездымных порохов / П.Ф. Похил, Л.Ф. Ромаданова, М.М. Белов // Физика взрыва. – М., 1955. – № 3. – С. 93-97.
3. Винникова В.Г. Исследование механизма горения соединений класса диолов в качестве компонентов твердых ракетных топлив : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.07 / Винникова Валентина Григорьевна. – М., ИФХ АН СССР, 1973. – 147 с.
4. Похил П.Ф. Методы исследования процессов горения и детонации / П.Ф. Похил, В.М. Мальцев, В.М. Зайцев. – М. : Наука, 1969. – 297 с.
5. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива / Б.В. Канторович. – М. : Книга по требованию, 2013. – 600 с.
6. Зельдович Я.Б. К теории горения порохов и взрывчатых веществ / Я.Б. Зельдович // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1942. – № 11-12. – С. 498-509.

References:

1. Pokhil P.F. O mekhanizme gorennya bezdymnykh porokhov [On the mechanism of burning smokeless powders]. *Fizika vzryva – Explosion physics*, 1953, no. 2, pp. 181-195. (Rus.)
2. Pokhil P.F., Romadanova L.F., Belov M.M. O mekhanizme gorennya bezdymnykh porokhov [On the mechanism of burning smokeless powders]. *Fizika vzryva – Explosion physics*, 1955, no. 3, pp. 93-97. (Rus.)
3. Vinnikova V.G. *Issledovaniye mekhanizma gorennya soyedineniy klassa diolov v kachestve komponentov tverdykh raketnykh topliv*. Diss. kand. techn. nauk [Investigation of the mechanism of burning compounds of the class of diols as components of solid rocket fuels. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1973. 147 p. (Rus.)
4. Pokhil P.F., Mal'tsev V.M., Zaitsev V.M. *Metody issledovaniya protsessov gorennya i detonatsii* [Methods for studying the processes of combustion and detonation]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 297 p. (Rus.)
5. Kantorovich B.V. *Osnovy teorii gorennya i gazifikatsii tverdogo topliva* [Fundamentals of the theory of combustion and gasification of solid fuels]. Moscow, Kniga po trebovaniyu Publ., 2013. 600 p. (Rus.)
6. Zel'dovich Ya.B. K teorii gorennya porokhov i vzryvchatykh veshchestv [On the theory of the combustion of powders and explosives]. *Zhurnal eksperimenta'noy i teoreticheskoy fiziki – Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1942, no. 11-12, pp. 498-509. (Rus.)

Рецензент: В.О. Маслов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 21.03.2019