

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ ПО ВИСОТІ КИПЛЯЧОГО ШАРУ

Губинський С.М.¹, Сибір А.В.², Федоров С.С.², Рижков А.В.³

¹Український державний університет науки і технологій, Україна

²Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Україна

³ Thermal & Material Engineering Center SP. Z O. O., Польща

Анотація. Робота присвячена експериментальному дослідженню електропровідності киплячого шару з частками графіту. Метою дослідження є визначення зміни електропровідності по висоті киплячого шару. Дослідження проводилося на установці камерного типу з діаметром робочого простору 110мм при числі псевдозрідження 2-3. В результаті вперше при нагріві у електротермічному киплячому шарі підтверджено нерівномірний розподіл електричного опору по його висоті. Величина питомого опору підвищується по мірі занурення у шар з його поверхні і може складати 3-5 разів. Нерівномірність питомого опору по висоті шару зменшується з підвищенням температури. Різниця у розподілі потужності пов'язана з нерівномірністю електричного опору по висоті шару і може призвести до перепаду температур, що може досягати декілька десятків градусів.

Ключові слова: електротермічний киплячий шар, лабораторна піч, електропровідність, висота шару, перепад температур

Одним з важливіших показників печей з електротермічним киплячим шаром (ЕКШ) є рівномірність температурного поля у робочому просторі, що забезпечує якість продукції що виробляється. Рівномірність температур забезпечується насамперед значним перемішуванням часток у шарі. В той же час нерівномірний розподіл теплових джерел при проходженні струму може приводити к виникненню різниці температур у шарі. Так, дослідження розподілу джерел по радіусу робочого простору [1] та їх вплив на перепад температур показав, що цей перепад не перевищує 25-50°. Інакше виглядають данні, що відносяться до вертикальної складової температур. Відомо, що ряд дослідників визначили, що розподіл джерел теплоти по висоті ЕКШ нерівномірний [1,2]. Дослідження проводилися при нормальній температурі. У [1] вимірювався електричний опір між електродами «центральный – боковий» - при цьому частина центрального електроду електроізолювалася по висоті

(рис.1) . Тобто електричний опір шару у верхній частині перевищував опір у нижній частині в 1,3-1,4 рази.

В роботі [2] досліджено шар малих розмірів, де електроди були встановлені на стінах циліндричної камери, в якій був реалізований киплячий шар. Результати показали, що питомий електричний опір у верхній частині шару більший за нижню частину в 4,5 рази. При цьому вплив зміни числа псевдозрідження від 1,25 до 1,78 не змінив це відношення. Таким чином, можливо стверджувати, що різниця у електричному опорі по висоті шару може впливати на розподіл температур і повинна бути досліджена в умовах нагріву.

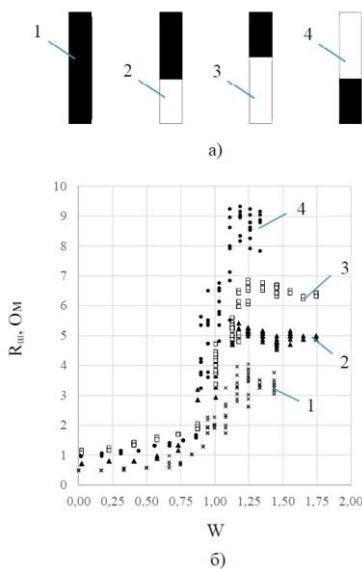


Рисунок 1 - Зміна опору шару за часткової ізоляції електроду [2]

- а) варіанти ізоляції центрального електроду;
 б) результати вимірювань

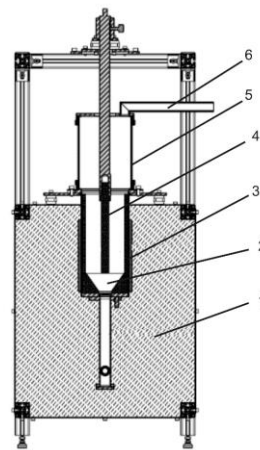


Рисунок - 2 Камерна установка з ЕКШ з максимальною температурою 1200°C

- 1 -теплова ізоляція,
 2 – засипка з керамічних кульок,
 3 – боковий електрод,
 4 – центральний електрод,
 5 – корпус з кварцового скла,
 6 – відвід відхідних газів

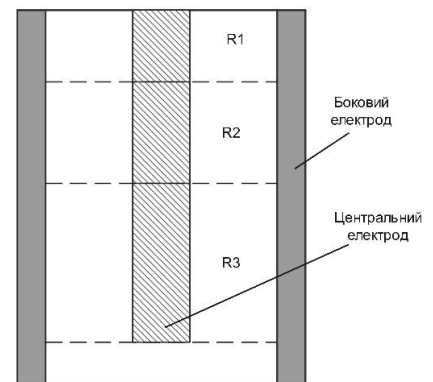


Рисунок - 3 Розрахункова схема визначення електричного опору киплячого шару по висоті

Для проведення досліджень при температурі до 1200°C було створено установку з можливістю візуального контролю процесу з використанням

корпусу з кварцового скла (рис. 2). Діаметр робочого простору 110мм, діаметр електроду 20мм. Для проведення досліджень при температурі до 1200°C було створено установку з можливістю візуального контролю процесу з використанням корпусу з кварцового скла (рис. 2). Діаметр робочого простору 110мм, діаметр електроду 20мм. Експерименти проводилися на природньому графіті з розміром часток 300-400 мкм, які забезпечують якісний бульбашковий киплячий шар. Висота щільного шару графіту перед нагрівом складала 130 мм. Нагрів проводився при різному заглибленні електроду у шар - 25мм, 60 мм і 95 мм. В процесі нагріву визначалась величина напруги і фіксувалися струм, потужність, та температура на рівні кінця електроду. Температура вимірювалася термопарою типу ХА. В результаті було визначено інтегральний електричний опір, що складався з трьох паралельних опорів – R1 – верхня частина електроду (25мм), R2 – середня частина електроду (35мм) , R3 – нижня частина електроду (45мм). Розв'язуючи систему рівнянь для паралельних опорів, послідовно визначали опори R1, R2, R3 (рис. 3) На основі отриманих даних визначалися питомі показники електричного опору кільцевого киплячого шару по залежності [2]

$$P_{ш} = \frac{R}{\frac{\ln r_{зов}}{r_{внут}}} \quad (1)$$

де $P_{ш}$ - питомий електричний опір киплячого шару, Ом*м ;

R - електричний опір шару, Ом ,

r - зовнішній та внутрішній радіуси та висота киплячого шару, м.

Результати експериментальних досліджень розподілу електричного опору по висоті шару наведені у таблиці 1 та рисунку 4. Вони підтвердили відомі дані - зниження електричного опору з ростом температури та величини занурення електроду у ЕКШ. Також підтверджено, що питомий електричний опір киплячого шару підвищується по висоті по мірі заглиблення від верхньої його границі (рис. 4) . Це притаманно температурам в діапазоні до 1000°C. При цьому різниця між опорами зменшується з ростом температури. Так при температурі шару 500°C питомий опір на глибині 95мм перевищує опір шару на поверхні в 3,9 раз, а при температурі 1000°C це відношення складає 2,8 рази.

Відповідно відрізняється теплова потужність по висоті шару, що може призводити до нерівномірного температурного поля по висоті шару. Цьому процесу заважає теплообмін пов'язаний з масообміном по вертикалі киплячого шару. Він визначається переносом теплоти разом з частками матеріалу. Для оцінки впливу обох факторів було проведено розрахунок перепаду температур по висоті ЕКШ відповідно до умов експериментальних досліджень. Розрахункова схема відповідає стаціонарним умовам для пластини, яка послідовно має горизонтальні частки з різним рівномірним виділенням джерел теплової енергії, що мають різні електричні опори R1, R2, R3 (рис.3). Визначення перепаду температур по висоті шару проводили по відомій залежності:

$$\Delta t = \sum_{i=1}^3 q_v^i \frac{\delta_i}{2\lambda_{\text{ш}}^{\text{еп}}} \quad (2)$$

де Δt – перепад температур по висоті киплячого шару, °С,

q_v^i – питома потужність джерел Джоулевої теплоти, Вт/м³,

δ_i – висота розрахункової ділянки киплячого шару, м,

$\lambda_{\text{ш}}^{\text{еп}}$ - ефективна теплопровідність киплячого шару у вертикальному напрямку, Вт/мК

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень ЕКШ

Температура, °С	Висота заглиблення центрального електроду, мм	Сила струму, А	Напруга, В	Опір ЕКШ, Ом
500	25	47	49	1,04
	60	61	43	0,70
	95	45	31	0,60
700	25	61,5	48	0,78
	60	70	42	0,50
	95	60	30	0,41
1000	25	60	47	60
	60	90	45	90
	95	98	40	98

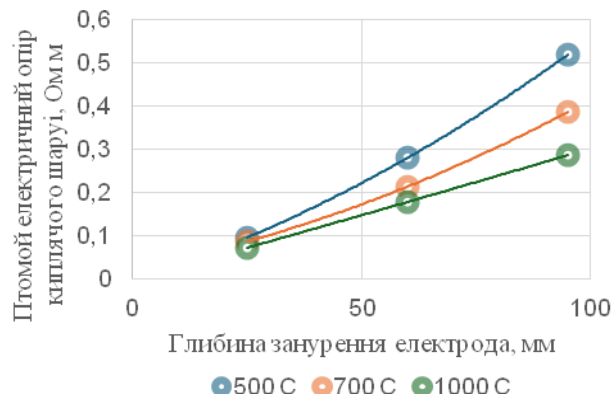


Рисунок - 4 Залежності питомого електричного опору ЕКШ в залежності від температури і висоти ЕКШ

Розрахунки перепаду температур показали, що він може складати біля 50-60°C в умовах проведення експерименту, максимум у верхній частині шару. Таким чином, для ведення технологічного процесу необхідно вимірювати температуру на рівні кінця занурення електрода, що гарантує отримання заданої температури у всьому об'ємі киплячого шару.

ЛІТЕРАТУРА

1. Федоров С.С. Високотемпературна обробка вуглецевих матеріалів в електротермічному киплячому шарі. Дніпро: Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України 2022, 134 с.
2. Malinovskii A. I., Rabinovich O. S., Borodulya V. A., Greben'kov A. Zh, and Sidorovich A. M. Local conductivity of a fluidized bed consisting of particles *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 85, No. 2, March, 2012.

EXPERIMENTAL STUDIES OF ELECTRIC CONDUCTIVITY DISTRIBUTION ALONG THE HEIGHT OF THE FLUIDIZED BED

Hubynskiy Semen, Sibir Artem, Fedorov Serhii, Ryzhkov Andriy

Abstract. *This work is focused on the experimental research into the electrical conductivity of a fluidized bed with graphite particles. The aim of the study is to determine the change in electrical conductivity along the height of the fluidized bed. The study was carried out on a chamber-type unit with a working space diameter 110 mm at a fluidization index 2-3. As a result of the experimental research, during heating in electrothermal fluidized bed, the uneven distribution of electrical resistance along the bed height was confirmed for the first time. The resistivity value increases 3-5 times with the depth of immersion into the bed from its surface. The unevenness of the resistivity along the height of the bed decreases with increasing temperature. The difference in power*

distribution due to uneven electrical resistance along the bed height can lead to a temperature difference of several tens of degrees.

Keywords: *electrothermal fluidized bed, laboratory furnace, electrical conductivity, bed height, temperature difference.*

REFERENCE

1. Fedorov S.S. Vysokotemperaturna obrobka vuhletsevykh materialiv v elektrotermichnomu kyplachomu shari Dnipro: Instytut chornoj metalurhii im. Z.I. Nekrasova NAN Ukrainy 2022, 134p.
2. Malinovskii A. I., Rabinovich O. S., Borodulya V. A., Greben'kov A. Zh, and Sidorovich A. M. Local conductivity of a fluidized bed consisting of particles *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 85, No. 2, March, 2012.