

**Смачивание керамической поверхности как фактор, определяющий биостойкость фасадной керамики/ Коц Л. С., Федоренко О. Ю., Лесных Н. Ф., Шукина Л. П. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП», – 2013. - № 1 (977). – С. 132-136. – Бібліогр.: 4 назв.**

Зроблена спроба дати кількісну оцінку взаємозв'язку характеристик змочування керамічних поверхонь із стійкістю їх поверхневої структури і ступенем біологічної корозії.

**Ключові слова:** змочуваність поверхні, біостійкість, фасадна кераміка

An attempt to give quantitative estimation of intercommunication of ceramic surfaces moistening descriptions with the stability of their surface structure and the biological corrosion degree is undertaken.

**Keywords:** moistened of surface, biological firmness, facade ceramics.

## УДК 621.365.32.621.3.024

**М. Ю. ЛИТВИНЧУК**, аспірант, НТУУ «КПІ», Київ;

**І. Л. ШИЛОВИЧ**, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ», Київ

### КОНТАКТНИЙ ОПІР ШАРУ КОКСОВОЇ ПЕРЕСИПКИ

Розроблена оригінальна методика експериментального визначення площі плям контакту у шарі сипучого електропровідного матеріалу (коксу). Експериментально досліджена залежність електричного опору шару коксу від зовнішнього гравітаційного навантаження. Визначені діапазони залежності та автомобільності електричного опору сипучого шару та зовнішнього навантаження та ідентифіковані причини спостереженого явища.

**Ключові слова:** гравітаційне ущільнення, сипучий матеріал, контактний опір, графітація.

**Вступ.** У багатьох технічних агрегатах та технологічних процесах використовуються сипучі матеріали, які утворюють середовище, властивості якого, в свою чергу, визначаються розподілом частинок матеріалу та фізичною взаємодією між ними.

У техніці процеси пов'язані з протіканням електричного струму у сипучому вуглецевому матеріалі використовуються зокрема у нагрівальних печах. Ефективність виділення джоулевої теплоти при протіканні електричного струму у шарі сипучого матеріалу, значною мірою залежить від контактної взаємодії між частинками [1, 2]. В свою чергу, ці процеси пов'язані зі значними енергетичними витратами, і тому вимагають спеціального дослідження. Споживання електричної потужності згаданими нагрівальними печами досягає десятків і навіть сотень тисяч кіловат-годин. Скорочення витрат енергії наразі має актуальний характер.

В літературі проблемі контактної взаємодії та контактних опорів сипучих вуглецевих матеріалів присвячена обмежена кількість публікацій, наприклад, робота [3]. Обмежений характер публікацій пояснюється складністю дослідження властивостей сипучого матеріалу через різноманітність його статистичних станів навіть за умови однаковості гранулометричного складу.

Ця стаття присвячена експериментально-розрахунковому вивченню контактного опору коксу при різних фізичних умовах: різних висотах сипучого шару, зовнішніх навантажень. Практична направленість дослідження стосується тепловиділяючої комірки промислової печі непрямого нагріву.

**Мета роботи.** Метою роботи є оцінка щільності електричного струму, який протікає через насипний шар коксу. Зрозуміло, що щільність електричного струму обернено пропорційна площі поперечного перерізу контактів які утворюються між частинками коксу. Отже, необхідно оцінити площу контактів, які приймають участь у процесі переносу струму. Реальна коксова пересипка складається з частинок певної гранулометрії. Отже, необхідна систематизація вивчення характеристик пересипки експериментально-розрахунковим шляхом.

**Постановка задачі досліджень.** Авторами [4] була отримана аналітична формула для напруження стискання у ланцюгу пружних елементів, розділених демпферними прошарками, в залежності від кількості елементів та демпферів, а також виконано експериментальну перевірку розрахунків за вказаною формулою.

Перш за все необхідно визначити реальні значення поверхні контактів у сипучому шарі. Ця задача вирішується для двовимірної поверхні, яка утворюється між двома шарами коксу. Для цього розроблена оригінальна методика визначення площі контактів та її обчислення.

Іншою важливою проблемою досліджень є визначення впливу нормального тиску на зміну електричного опору між частинками коксу.

**Методика проведення досліджень.** Для визначення поверхні контактів засипався один шар коксу промислового гранулометричного складу обмеженої площі з жорсткими границями (рис. 1). Після чого, цей шар коксу накривався папером і ще одним шаром коксу тієї ж площі з жорсткими границями. Між папером і шаром коксу вкладався копіювальний папір. З зовнішньої поверхні верхнього шару прикладалось рівномірно розподілене навантаження. Після зняття навантаження на папері лишалися відбитки, які відображали площу контактів частинок коксу. Один з аркушів з відбитками плям контактів зображений на рис. 2.



Рис. 1 – Вид зверху шару коксу промислового гранулометричного складу обмеженої площі з жорсткими границями

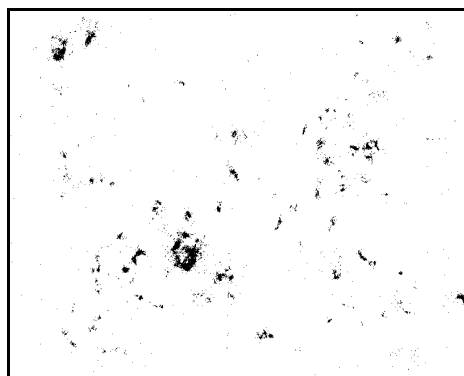


Рис. 2 – Вигляд плям контактів частинок коксу

З метою обчислення площі плям відбитків була створена оригінальна автоматизовано-інформаційна система “Pixel” на платформі .Net мовою С#. В основі АІС “Pixel” лежить ідея ідентифікації цифрового позначення кольору сканованого зображення шляхом логічного порівняння. Для практичного застосування був створений дружній інтерфейс користувача АІС “Pixel”. Інтерфейс користувача включає інформаційні поля і функціональні кнопки, за допомогою яких зображення завантажується в програму. Програма виконує автоматичну обробку сканованого зображення за принципом: все що не біле сприймається як інший колір (чорний). Аркуш з відбитками у вигляді плям підлягає цифровій обробці шляхом сканування. Піксельне зображення плям надалі аналізується програмою, в якій вихідними даними є кількість чорних та білих пікселів. Загальний вигляд робочого вікна користувача показаний на рис. 3.

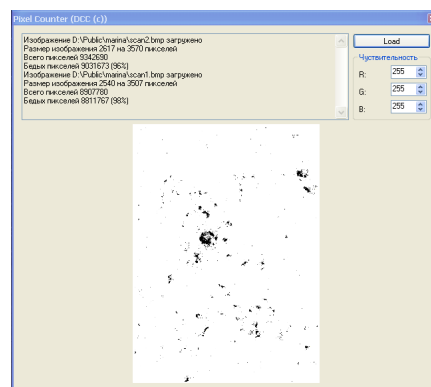


Рис. 3 – Інтерфейс користувача АІС “Pixel”

Таким чином, користувач отримує інформацію про кількісне (у пікселях) співвідношення поверхні контактів сипучого шару коксу, яке можна перевести в абсолютне значення поверхні.

Обробка серії експериментів плям контактів між двовимірними шарами обмеженої площі з жорсткими границями отримані за допомогою АІС "Pixel" дає діапазон значень

від 4% до 6% загальної поверхні зайнятої шаром коксу.

Для подальшого практичного використання отриманих результатів з метою оцінки механічної взаємодії між частинками коксу було виконане експериментальне дослідження впливу зовнішнього навантаження на контактний опір коксової пересипки. Дослідження було виконане при кімнатних

температурах на установці, зовнішній вигляд якої зображений на рис. 4.

**Методика експериментів .** У пустотілий скляний циліндр 1 на мідне дно 5 засипався шар коксу заданої висоти і певного гранулометричного складу. Для експериментів використовувався кокс з розміром частинок + 20 мм. Висота шару коксу вибиралася виходячи з того щоб середня кількість частинок  $n$  по висоті шару відповідала певним значенням  $n = 3, 5 \dots 10$ , для яких у попередніх дослідженнях [4] була отримана розрахункова залежність напруження стискування  $\sigma$  для ланцюга з рівномірно розподілених  $n$  елементів (частинок). Зверху шар коксу закривався мідним диском діаметром 79 мм. Диски забезпечували усереднений за поверхнею електричний контакт на нижній та верхній границі сипучого шару. Контактні диски приєднувалися до стабілізатора напруги з використанням мікросхеми SD 1084 (1083), схема якого детально представлена у роботі [5].

До верхнього денця прикладався строго вертикально зовнішнє навантаження, яке змінювалося дискретно. В ході експериментів вимірювалися перепад напруги між металевими денцями і електричний струм у шарі коксу заданої висоти. За результатами вимірювань напруги і струму обчислювався електричний опір заданого шару коксу.

**Обговорення результатів.** Було проведено декілька серій експериментів, в яких змінювалися висота шару коксу і зовнішнє навантаження. При зміні зовнішнього навантаження вимірювалися електричний струм, який протікав через шар коксу, та перепад напруги. У підсумку визначався електричний опір для шарів коксу різної висоти при змінному навантаженні.

Навантаження обчислювалося як тиск, розподілений по поверхні контактів між частинками. При обчисленнях тиску площа поверхні контактів визначалася за допомогою вищеназваної АІС "Pixel". Середнє значення площі поверхні контактів в експериментах не перевищувало 4% від загальної площі верхнього денця. Результати експериментів зображені у вигляді графіку (рис. 5).

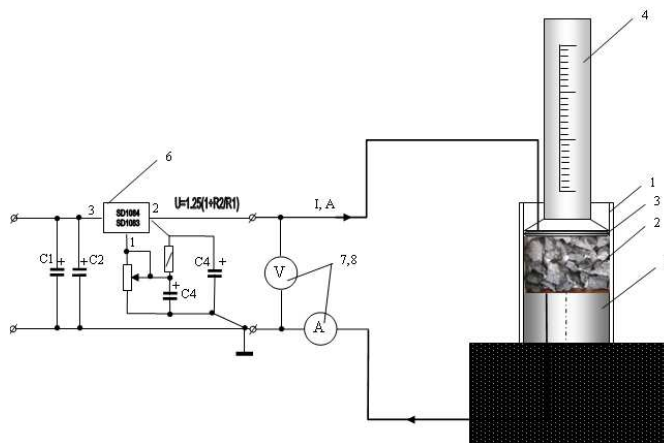


Рис. 4 – Робоча комірка експериментальної установки для дослідження впливу зовнішнього навантаження на контактний опір коксової пересипки: 1 – скляний формуючий циліндр; 2 – шар коксу; 3 – стабілізатор рівня; 4 – мірний циліндр; 5 – мідне дно; 6 – стабілізатор напруги; 7, 8 – контрольно-вимірювальні прилади

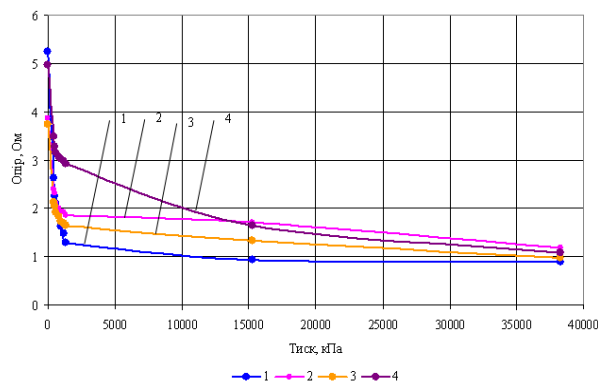


Рис. 5 – Електричний опір коксової пересипки в залежності від зовнішнього навантаження для висоти шару: 1 – 50 мм; 2 – 100 мм; 3 – 150 мм; 4 – 200 мм

Графік на рис. 5 представляє собою узагальнені результати всіх серій експериментів.

В експериментах також визначалися площі контактів при змінному навантаженні. В результаті обробки даних спостережень були отримані середньозважені значення кількості контактів, а також середнє значення площі одного контакту. Результати вимірів приведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Площа контактів в залежності від навантаження

Навантаження, кПа	Площа контактів, м <sup>2</sup>	Середній радіус плями контакту, м
Без навантаження	0,00007152	0,000148
1413,8	0,00007221	0,000197
2106,7	0,0001084	0,00031

**Аналіз отриманих результатів.** Для більш ґрунтовного аналізу нижче на рис. 6 у збільшеному масштабі окремо виділено область з найбільш інтенсивною зміною опору.

З рис. 6 добре видно, що при відсутності зовнішнього навантаження електричний опір коксової пересипки знаходиться у певній відповідності до висоти шару. Ця закономірність полягає у наступному: зменшення електричного опору шарів коксу 100 і 150 мм порівняно з електричним опором 50 мм пояснюється наявністю гравітаційного стискання, яке цілком природно більше для шарів 100 і 150 мм, ніж для шару 50 мм. Що ж стосується шару 200 мм, то зрозуміло, що кількість частинок коксу по висоті шару, а отже, і контактних опорів більше (приблизно в два рази ніж у шарі 100 мм), що і обумовлює отримане значення початкового опору (рис. 6). Гравітаційне ущільнення у цьому випадку не достатньо велике для суттєвого зменшення опору. Підтвердженням сказаного є точки перетину графіків на графіку (рис. 6).

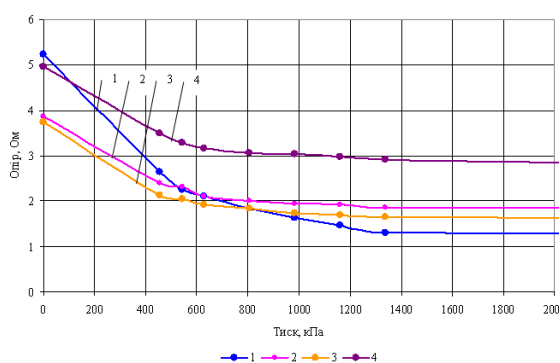


Рис. 6 – Електричний опір коксової пересипки в залежності від зовнішнього навантаження (у діапазоні 0 - 5000 Па) для висоти шару: 1 – 50 мм; 2 – 100 мм; 3 – 150 мм; 4 – 200 мм

Таким чином, вищеописані експериментальні дані дають можливість кількісно оцінити фізичний принцип залежності контактного опору від механічного навантаження.

Справедливість зроблених висновків відносно співвідношення навантаження і висоти шарів коксу підтверджується аналізом зміни характеру графіків (рис. 6). Так, на рисунку 6 добре видно, що графіки для різних шарів відрізняються інтенсивністю зменшення опору від навантаження. Аналіз показує, що інтенсивність зміни опору шару 50 мм перевищує інтенсивності зміни опору всіх інших шарів. Подальший аналіз особливості поведінки графіків підтверджує вищеописане співвідношення початкових опорів і висоти шару на прикладі перетину графіків 1, 2, 3 (рис. 6) у діапазоні тисків 400...800 кПа. Перетин графіків відображає вищезгаданий фізичний принцип, згідно якого механічне навантаження не впливає на зміну контактного опору при певній довжині ланцюга електропровідних елементів.

На графіках спостерігається також суттєва відмінність інтенсивності зміни опору на початковій ділянці для всіх висот. Опір для тиску від 0 до 420 кПа зменшується у 1.98...1.42 рази для висот шарів відповідно від 50 до 200 мм. Інтенсивність зміни опору з ростом механічного навантаження більше 420 кПа зменшується до значень 1.73...1.12. Тобто спостерігається неоднакова інтенсивність зміни контактного опору від механічного навантаження. До того ж, з наведених чисельних даних на початковій ділянці ця

інтенсивність суттєво більша, ніж при більшому навантаженні для всіх висот шарів коксу, що свідчить про інший фізичний фактор впливу.

Показані на рис. 5 графіки залежностей якісно співпадають з емпіричною формулою, наведеною у [1]. Необхідно зауважити, що автор [1] не дає фізичного обґрунтування механізму зміни контактної опору від дії механічного навантаження, наведена формула містить лише обернену пропорційність навантаження у ступені 1/3. В роботі [6] наведено формулу для розрахунку контактної опору в залежності від лінійного розміру контактної плями:

$$R_c = \left( \frac{\rho}{2 \cdot a} \right) \cdot \left[ 1 - 1.41581 \cdot \left( \frac{a}{R} \right) + 0.06322 \cdot \left( \frac{a}{R} \right)^2 + 0.15261 \cdot \left( \frac{a}{R} \right)^3 + 0.19998 \cdot \left( \frac{a}{R} \right)^4 \right], \quad (1)$$

де  $\rho$  – питомий електричний опір матеріалів, що контактують, Ом·м;  $a$  – напівось еліптичної плями контакту, м;  $R$  – радіус уявного циліндру протікання електричного струму між двома середовищами, що контактують, м. В нашому випадку, приймаючи круглу форму плями контакту, вважатимемо, що  $a$  дорівнює радіусу плями контакту. В свою чергу, вважаємо  $R$  середнім значенням радіуса частинок коксу, що контактують. На рис. 7 наведено графік побудований за формулою (1).

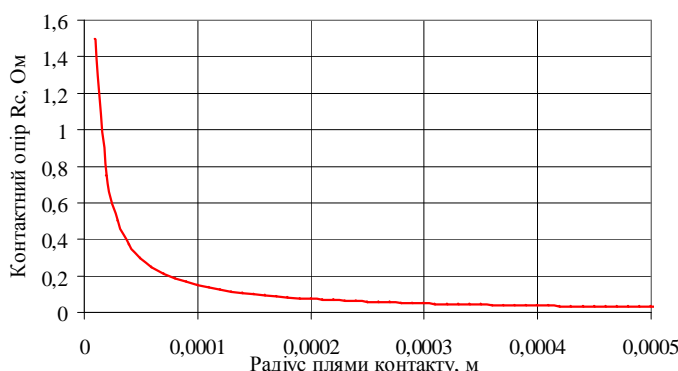


Рис. 7 – Контактний опір між частинками коксу розрахований за формулою (1)

Таким чином, згідно теоретичних викладень автора [6] явище різкого зменшення контактної опору, що спостережено в експериментах (рис. 5), пояснюється зміною розміру плями контакту.

Співставлення розрахованих середніх радіусів плям контактів (табл. 1) і значень, отриманих за формулою (1), показує, що експериментальні дослідження відповідають ділянці рівномірного спадання 0.0001...0.0004, м на графіку (рис. 7). З іншого боку, співставлення значень навантажень (табл. 1) та характеру кривих на графіку (рис. 5) показує, що досліджене явище суттєвої зміни контактної опору відбувається саме для розрахованих середніх радіусів плям контактів у діапазоні значень 0.000154...0.00031, м. Отже, отримані експериментальні дані щодо зміни контактної опору в залежності від навантаження знаходяться у протиріччі з теоретичними уявленнями у вигляді узагальнюючої залежності (1), яка представлена у роботі [6]. Ця розбіжність пояснюється тим, що вказані теоретичні дослідження виконані для окремих металевих провідників і не стосуються крихких сипучих матеріалів, одним з яких є кокс.

Детальний аналіз зміни контактної опору від навантаження показує, що при збільшенні навантаження змінюються як кількість контактів, так і площа окремого контакту, що ілюструється збільшенням загальної площі контактів (табл. 1). Залежність контактної опору від навантаження (рис. 6) має обернено пропорційний характер. Особливістю цієї залежності є те, що при досягненні деякого значення зовнішнє навантаження перестає суттєво впливати на величину контактної опору.

Досліджені відмінності впливу розмірів плям контактів та навантажень на контактний опір свідчать про те, що помітне падіння контактної опору на початковій ділянці графіків (рис. 5 – 7) має іншу фізичну природу. Для з'ясування цих особливостей виконана оцінка температурного рівня місця контакту за формулою [7]:

$$T = \frac{I^2 \cdot R}{2 \cdot \rho \cdot \lambda}, \quad (2)$$

де  $I$  – електричний струм, який протікає через шар коксу, А;  $R = \rho / (2 \cdot a)$  – контактний опір, Ом;  $a$  – радіус плями контакту, м;  $\rho$  – питомий опір коксу, Ом·м;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності коксу, Вт / (м·К). Результати розрахунків за формулою (2) показали, що за умови одиночного контакту з середнім радіусом 0,00015 мм (тобто таким, який був визначений в експерименті без навантаження, табл. 1) температура досягає  $T = 1050$  К. Результатом розігріву контактів є зниження рівня початку пластичної деформації зон контактів.

Для перевірки рівня підвищення температури у місцях контактів до розрахункової величини було виконане додаткове дослідження явища іскріння. Дослідження виконувалося у короткому (3-5 окремих частинок коксу) електричному ланцюгу, через який пропускався постійний струм. У дослідженнях вимірювали величини струму і

напруги, а також виконували оцінки площі контактів. При обробці результатів обраховували контактний опір, джоулеву теплоту, яка виділяється у місці контакту. Ділянка експериментального ланцюга з іскровим розрядом представлена на рис. 8.

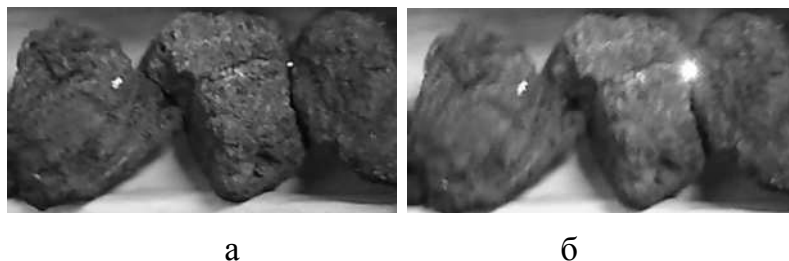
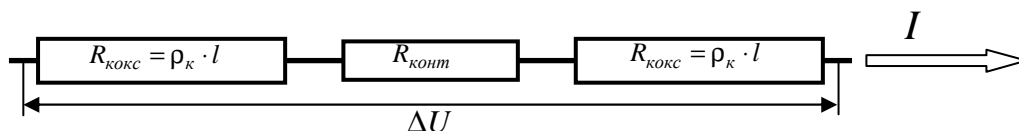


Рис. 8 – Іскровий розряд між частинками коксу: а- фаза початку розряду; б- розряд через 0,2 с після фази а

Для аналізу представимо електричний ланцюг, показаний на рис. 9 у вигляді еквівалентних опорів (рис.10). Лінійні розміри опорів у напрямку протікання електричного струму прийемо у співвідношенні: довжина ділянки контактного опору  $\delta$  приймається одного порядку з поперечним розміром плями контакту (тобто  $\approx 10^{-4}$ м), середнє значення довжини частинки коксу  $l$  для розглянутого гранулометричного складу приймається  $1 \cdot 10^{-2}$  м.



З теорії [7] відомо, що головним чинником виділення джоулевої теплоти у розглянутому ланцюгу елементів є контактний опір. Оцінка співвідношення електричних опорів еквівалентної схеми за прийнятими припущеннями та із врахуванням експериментальних даних величин струму ( $I = 0,8$  А) та падіння напруги ( $\Delta U = 8,48$  мВ) показує, що  $R_{конт} / R_{кокс} > 300$ . Прийемо наступні припущення. Лінійні розміри еквівалентного контактного опору між двома частинками коксу  $\delta$  є одного порядку з поперечним розміром плями контакту (тобто  $\approx 10^{-4}$ м); тобто будемо вважати, що вся теплота буде виділятися у кубічному об'ємі з розміром грані  $\delta$ . Властивості цього елементарного об'єму (опір, густина, теплоємність) будемо вважати такими самими, як і у коксу. Час встановлення (або порушення контакту) згідно із спостереженнями (рис. 9) не перевищує 0,2 с. Отже, можемо вважати умови тепловиділення як такі, що відбуваються у адіабатних умовах. Це означає, що основна маса коксових частинок (крім зони контакту) не буде нагріватися і їхня температура лишатиметься незмінною при виділенні теплоти. Запишемо рівняння теплового балансу:

$$I^2 \cdot R_{конт} \cdot \tau = (\delta^3 \cdot \rho_{кокс}) \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1)$$

Звідки отримаємо:

$$t_2 = \frac{I^2 \cdot R_{конт} \cdot \tau}{(\delta^3 \cdot \rho_{кокс}) \cdot c_p} + t_1$$

Виконані розрахунки дозволили оцінити вказану температуру в межах  $t_2 = 770 - 820$  °С або  $T_2 = 1043 - 1093$  К, що задовільно збігається з рівнем температур, які передбачає формула (2). Рівень температури  $t_2$ , навіть за умови відсутності іскрового розряду, забезпечується величиною щільності електричного струму, яка досягає у зоні контакту величини 7,4 - 11,2 кА.

Аналіз отриманих результатів показує, що в місцях контактів частинок коксу температура може суттєво підвищуватися, внаслідок чого фізичні властивості матеріалу (у тому числі границя пластичної деформації), що контактує, зазнають певних змін.

**Висновки.** За допомогою спеціально розробленої експериментальної установки отримані графічні залежності контактного опору від зовнішнього навантаження (тиску). Досліджено, що при прикладанні початкового тиску відбувається найбільш інтенсивне зменшення контактної опору порівняно з наступним збільшенням навантаження. Для експериментальних діапазонів тисків (0 - 420) кПа інтенсивність зменшення електричного опору становить 1.98...1.42, для діапазону більше 420 кПа – становить 1.73...1.12.

1. Розроблені оригінальна методика і програма оцінки розмірів плям контактів. Створена оригінальна автоматизовано-інформаційна система обчислення площі плям контактів, яка базується на ідентифікації цифрового позначення кольору сканованого зображення відбитків плям контактів шляхом логічного порівняння.

2. На підставі порівняння експериментальних та розрахункових даних встановлено, що на початковому етапі стискування при малих навантаженнях суттєвий вплив на зменшення електричного опору сипучого вуглецевого матеріалу має значне (до 820 °С) збільшення температури у місцях точкових контактів.

**Список літератури:** 1. Гальперин Б. С. Непроволочные резисторы / Гальперин Б. С. — Л. : Энергия, 1968. — 158 с. 2. Клейн Г. К. Строительная механика сыпучих тел / Клейн Г.К. ; пер. с англ. — М.: Стройиздат, 1977. — 256с. 3. Hideyuki Yamaoka. A Theoretical Model for the Contact Phenomenon of Coke Particle Accompanied by the Compressive Breakage at the Contact Plane / Hideyuki Yamaoka, Kaoru Nakano // ISIJ International. — 2003, №1 (Vol. 43). — pp. 36–43. 4. Литвинчук М. Ю. Спрощена механічна модель ланцюга елементів сипучого матеріалу / Литвинчук М.Ю., Шилович І.Л. // Наукові вісті НТУУ КПІ. – 2010, № 6. – С. 22-25. 5. Литвинчук М. Ю. Стратифікована тепловідділяюча комірка печі графітації Ачесона з підвищеним вмістом оборотних матеріалів / Литвинчук М. Ю., Федорчук І. Ю., Шилович І. Л. // Збірка тез XII Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Екологія. Людина. Суспільство”. – 2009. – С. 186-187. 6. Electrical contacts: principles and applications / edited by Paul G. Slade New York, Marcel Dekker Inc. 1999. – 1060 p. 7. Хольм Р. Электрические контакты. / Хольм Р. – М.: Издательство иностранной литературы, 1961. – С. 71-76.

Надійшла до редколегії 20.03.2013

УДК 621.365.32.621.3.024

**Контактний опір шару коксової пересипки/ М. Ю. Литвинчук, І. Л. Шилович//** Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2013. - № 1 (977). – С. 136-142. – Бібліогр.: 6 назв.

Разработана оригинальная методика экспериментального определения площади пятен контакта в слое сыпучего электропроводного материала (кокса). Экспериментально исследована зависимость электрического сопротивления слоя кокса от внешней гравитационной нагрузки. Определены диапазоны зависимости и автомодельности электрического сопротивления сыпучего слоя и внешней нагрузки и идентифицированы причины наблюдаемого явления.

**Ключевые слова:** гравитационное уплотнение, сыпучий материал, контактное сопротивление, графитация.

Specific method of experimental investigation of the contact spots area in granular layer of electrical conductive substance (coke) is developed. Dependence of the coke layer electrical resistance on the external gravitational load is investigated experimentally. Plot sectors of dependence and self-similarity electrical resistance and external load are specified. Origins of observed phenomena are identified.

**Keywords:** gravitation compaction, granulated material, contact resistance, graphitation.