

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЇ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ І ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**до випускної атестаційної роботи бакалавра**  
**зі спеціальності 136 – Металургія**

**Вдосконалення технології агломераційного процесу з метою підвищення його продуктивності**

Виконав:

Студент групи МТ 20-1 \_\_\_\_\_ Ростислав РИЖКО

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Дмитро БАБОШКО

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ Дмитро БАБОШКО

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ Сергій САВЕЛЬСВ

Кривий Ріг  
2024 р.

**ЗМІСТ**

## Вступ

### 1 Особливості газодинаміки шару, що піддається агломерації

1.1 Газодинамічна структура окремих зон шару, що спікається

1.2 Газодинамічний опір шару, що спікається

1.3 Газодинамічна структура зони формування агломерату

### 2 Дослідження усадки шару, що спікається

2.1 Розрахунок усадки агломераційної шихти в умовах  
рівноваги діючих в шарі сил

2.2 Дослідження усадки агломераційної шихти при дії  
ущільнюючого навантаження

### 3 Дослідження та розробка технології спікання агломераційної шихти з використанням підтримуючих стрижнів

3.1 Лабораторні дослідження факторів, що впливають на усадку  
шару при спіканні

3.2 Розробка та дослідження властивостей підтримуючих  
стрижнів

3.3 Результати дослідних спікань з використанням стрижнів

3.4 Дослідження структури аглоспеку та якості агломерату

## Висновки

## Список використаної літератури

## ВСТУП

Навантаження агломераційного спеку на зону горіння-плавлення чинить значний вплив на структуроутворення агломерату, особливо в нижній частині аглошару. Це збільшує газодинамічний опір шару, що спікається через закупорювання газових каналів, а також опосередковано впливає на якість агломерату.

Дослідженню вказаних процесів присвячено багато уваги, проте й сьогодні триває пошук дієвих способів уникнення негативного впливу навантаження аглоспеку, що вже сформувався, на нижче розташований шар агломераційної шихти.

З огляду на ці обставини пошук, дослідження та розробка технологічних рішень, направлених на підтримку агломераційного спеку й тим самим, нівелювання його негативної дії на шар, що спікається, залишається актуальним завданням для агломераційного виробництва.

# 1 ОСОБЛИВОСТІ ГАЗОДИНАМІКИ ШАРУ, ЩО ПІДДАЄТЬСЯ АГЛОМЕРАЦІЇ

## 1.1 Газодинамічна структура окремих зон шару, що спікається

Газодинаміка шару, що агломерується, відрізняється від газодинаміки однорідного шару двома принциповими особливостями. По-перше, з самого початку процесу агломерації в шарі матеріалу, що спікається, утворюється декілька зон, різних за структурою та таких, що мають внаслідок цього різний газодинамічний опір. Шар, що піддається агломерації, є типово неоднорідним. По-друге, в результаті протікання різних хімічних реакцій та фізичних процесів змінюються кількість, склад та температура газу при переході його з однієї зони в іншу.

Шар вихідної підготовленої (змішаної та огрудкованої) та покладеної на колосникову решітку агломераційної шихти з деякими припущеннями можна розглядати як однорідний ізотермічний, складений з частинок компонентів шихти й грудок різних розмірів. Як приклад можна навести агломераційну шихту, granulometriczny склад якої наведений на рисунку 1.1.

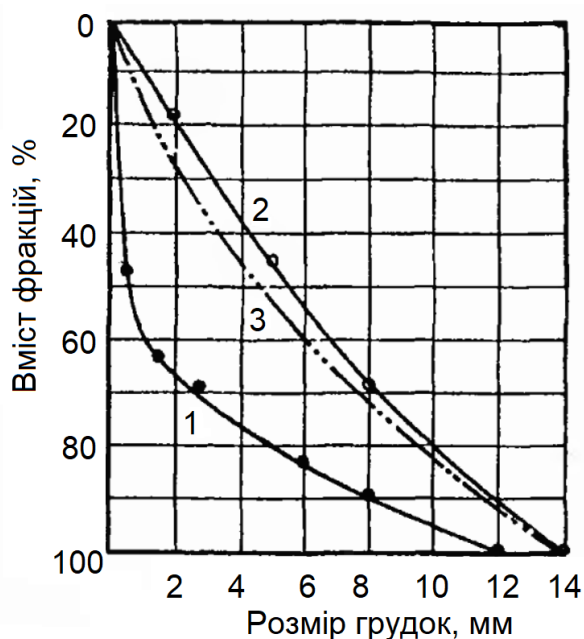


Рисунок 1.1 – Кумулятивні криві гранулометричного складу  
агломераційної шихти:  
1 – неогрудкованої; 2, 3 – огрудкованої

Кривою 2 показаний гранулометричний склад «ідеально огрудкованої» шихти, коли всі дрібні частинки «що грудкуються» (0–0,4 мм) накатані на грудки. Дійсний гранулометричний склад огрудкованої в умовах аглофабрики шихти буде характеризуватися деякою кривою, що лежить між лініями 1 і 2. Крива 3 демонструє гранулометричний склад шихти зі ступенем огрудкування 85%.

Газодинамічна структура огрудкованої шихти в першу чергу буде визначатися вихідним гранулометричним складом (співвідношенням фракцій, що грудкуються й що грудкують), наявністю зв'язуючих компонентів (випаленого вапна), а також режимом огрудкування.

Для оцінки газопроникності агломераційних шихт можна використовувати показник – питомий газодинамічний опір шару при певній заданій швидкості руху газу, наприклад,  $w=0,5$  м/с. Тоді при просмоктуванні через шар атмосферного повітря при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\rho_{\text{пов}}=1,205$  кг/м<sup>3</sup>;  $\nu=1,5\cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с)  $(\Delta p/h)_{0,5} = \rho w(\nu k_1 + w k_2) = 1,205 \cdot 0,5(1,5k_1 + 0,5k_2) = 0,3(3k_1 + k_2)$ , кПа/м.

Ступінь огрудкування чинить вплив не лише на величину еквівалентного діаметра грудок, але й на таку властивість шихти, як «структурна стійкість», тобто здатність зберігати отриманий в результаті огрудкування гранулометричний склад.

Шар погано огрудкованої шихти є неоднорідним – має неоднаковий градієнт тиску газу по висоті – нижні шари шихти під дією динамічних навантажень при укладанні на палети й під дією ваги лежачих вище шарів ущільнені й чинять більший газодинамічний опір. Вказана властивість шихти легко визначається дослідом, в якому вимірюються втрати напору газу в декількох розташованих по висоті шару точках при просмоктуванні через шар

повітря. Результати подібних дослідів для двох груп шихт наведені на рисунку 1.2.

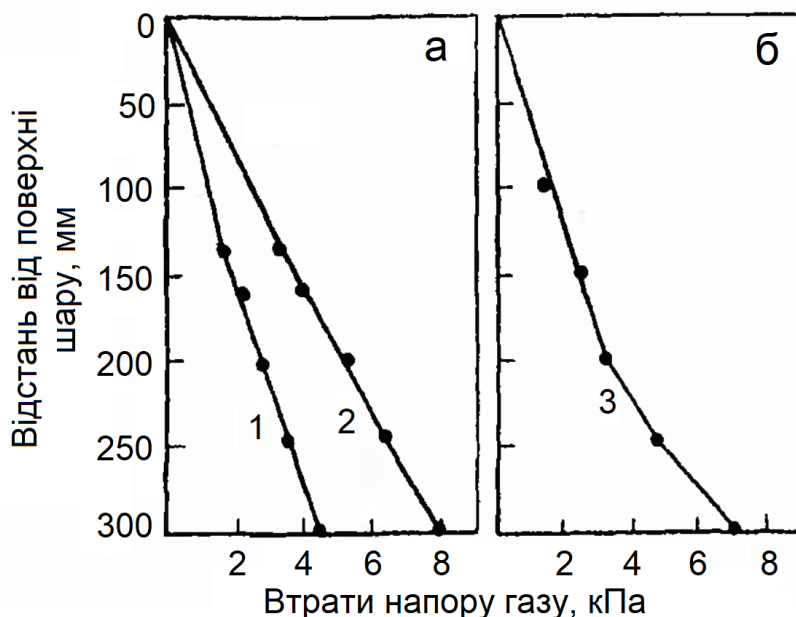


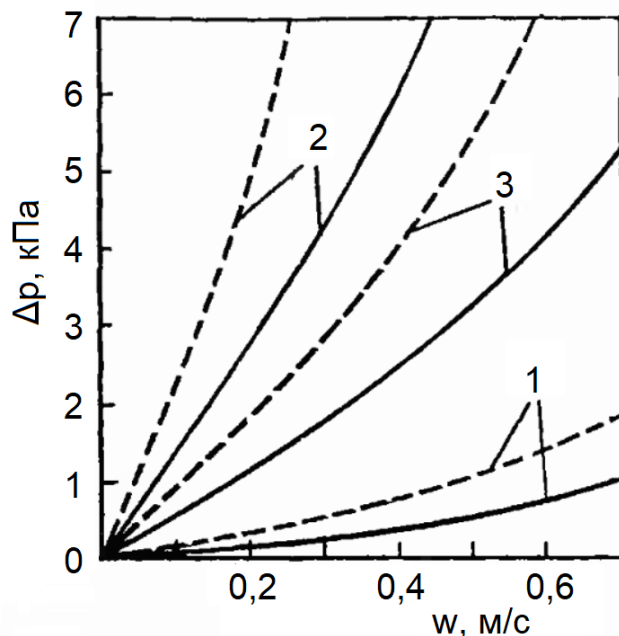
Рисунок 1.2 – Втрати напору газу по висоті шару шихти ( $w=0,3-0,4$  м/с):

а – структурно стійкої; б – структурно нестійкої; 1 – добре огрудкована шихта; 2 – практично неогрудкована шихта; 3 – погано огрудкована шихта

Перезволоження шихти, що завжди відбувається при спіканні холодних шихт, супроводжується значним погіршенням газопроникності шару. Відбувається це з двох причин: 1) волога, що конденсується, заповнює простір між частинками й грудками, внаслідок чого зменшується пористість шару; 2) в результаті перезволоження грудок зменшується їх міцність; під дією ваги шарів шихти, що лежать вище, відбувається деформація грудок – в деякій мірі знижується їх еквівалентний діаметр, що супроводжується усадкою, що призводить до додаткового зниження пористості шару й до підвищення його газодинамічного опору.

Хоча кількість вологи, що конденсується для різних типів шихт приблизно однакова – 1,0–1,5%, газопроникність їх після перезволоження

знижується по-різному: на 20–30% для добре огрудкованих, структурно стійких шихт й на 80–100% – для погано огрудкованих. Введення до складу шихти зв'язуючих речовин знижує негативний ефект перезволоження. Це ілюструється дослідними даними, наведеними на рисунку 1.3.



Рисунк 1.3 – Газодинамічні характеристики шихт вихідних (суцільні лінії) та перезволожених (пунктирні лінії):

1 – добре огрудкована шихта; 2 – погано огрудкована шихта; 3 – шихта з додаванням 4% випаленого вапна

Введення до складу шихти 4% випаленого вапна не лише значно підвищило її газопроникність, але й суттєво зменшило негативний вплив утворення зони перезволоження: швидкість просмоктування повітря при цьому знизилась лише на 30%. Єдиним способом, що дозволяє зберегти вихідну газопроникність шару, що спікається, є агломерація попередньо нагрітої (до укладання на агломашину) шихти.

В зоні сушки протікає ряд процесів, що чинять помітний і різноманітний вплив на зміну структури шару шихти. Насьогодні відсутня єдина точка зору щодо ролі цих процесів. Вважається, що інтенсивне випаровування вологи, яке супроводжується виділенням значної кількості

водяної пари, може руйнувати грудки й відповідно погіршувати газопроникність шихти. З іншого боку, наявність тонких колоїдних складових в компонентах шихти і вапні надає грудкам міцності, достатньої для протидії різним навантаженням. В результаті видалення вологи з шихти збільшується пористість шару, матеріал в зоні сушки може мати більш високу газопроникність у порівнянні з вологою шихтою.

Ймовірно, справедливі обидва твердження, кожне для свого типу шихт: перше – для тих, що погано грудкуються, друге – для тих, що добре грудкуються. Варто відзначити, що в обох випадках зміни структури шихти в зоні сушки є не значними.

Зона інтенсивного нагріву в аспекті зміни структури шару досліджена ще в меншому ступені, ніж зона сушки. Можна припустити й збільшення міжкускової пористості шару в результаті вигорання палива й дисоціації карбонатів, й її зменшення через спікання частинок й часткового плавлення.

Найбільш значна зміна структури шару відбувається в зоні плавлення (формування агломерату) при розм'якшенні й плавленні шихти.

Вимірювання показують, що в процесі агломерації загальна пористість шару майже не зменшується й разом з тим відбувається ущільнення матеріалу в окремих об'ємах. Кінцевим результатом такого складного характеру процесів є збільшення еквівалентного діаметра каналів шару в зоні формування агломерату – покращення його газодинамічної структури. Шар агломерату завжди має кращу газопроникність (в холодному стані), ніж шихта, з якої він отриманий.

На рисунку 1.4 наведені газодинамічні характеристики двох шихт, структура яких змінюється в ході агломерації, а також отриманих з них агломераційних спеків.



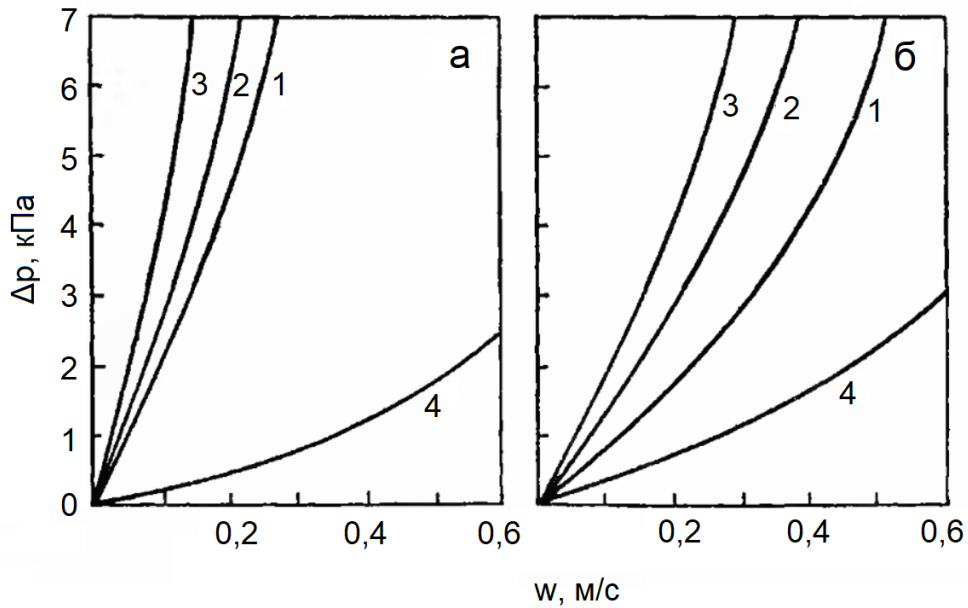


Рисунок 1.4 – Газодинамічна характеристика шихт на різних стадіях аглопроцесу (висота шару 300 мм):

а – шихта, що погано грудкується; б – шихта, що добре грудкується; 1 – вихідна; 2 – перезволожена; 3 – висушена; 4 – аглоспек

## 1.2 Газодинамічний опір шару, що спікається

Експериментальні данні, наведені на рисунках 1.3 і 1.4, характеризують лише один бік газопроникності – газодинамічну структуру шару. Між тим, втрати напору газу в шарі залежать й від його властивостей (густини й в'язкості). Щоб мати можливість зіставляти газопроникність пористих середовищ з урахуванням всіх параметрів газу й шару, доцільно основне рівняння газодинаміки представити в наступній формі:

$$\Delta p_{\text{ш}} = P_{\text{ш}} w_0 + S_{\text{ш}} w_0^2, \quad (1.1)$$

де  $P_{\text{ш}}$  і  $S_{\text{ш}}$  – узагальнюючі емпіричні коефіцієнти.

В деяких випадках для оцінки газопроникності пористого шару зручніше використовувати інший запис рівняння:

$$\frac{\Delta p}{h} = \rho_0 w_0 \left( v k_1 + k_2 w_0 \frac{T}{T_0} \right) = (v_t \rho_0 k_1) w_0 \left( 1 + \frac{k_2 T}{v_t k_1 T_0} w_0 \right);$$

$$\frac{\Delta p}{h} = r_{\text{ш}} w_0 (1 + m w_0), \text{ кПа/м} \quad (1.2)$$

де коефіцієнт  $r_{ш} = v_t \rho_0 k_1$  характеризує газодинамічний опір шару, а  $m = \frac{k_2}{v_t k_1} \frac{T}{T_0}$  – ступінь турбулентності газового потоку. При зміні умов руху газу величини  $r_{ш}$  і  $m$  змінюються цілком визначеним чином: чим кращі умови руху газового потоку, тим менше  $r_{ш}$  і більше  $m$ .

Як сильно впливають властивості газового потоку на газопроникність пористого шару, демонструють результати наступних розрахунків.

Питомий газодинамічний опір шару шихти з коефіцієнтами  $k_1 = 6 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$  й  $k_2 = 40 \text{ м}^{-2}$  при просмоктуванні через нього атмосферного повітря ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )  $\rho_0 = 1,205 \text{ кг/м}^3$ ,  $v_{20} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ :

$$\frac{\Delta p}{h} = (1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1,205 \cdot 6 \cdot 10^5) w_0 \left( 1 + \frac{40}{1,5 \cdot 6} \frac{293}{273} w_0 \right);$$

$$\frac{\Delta p}{h} = 10,84 w_0 (1 + 4,77 w_0), \text{ кПа/м,}$$

Показник питомого газодинамічного опору

$$\left( \frac{\Delta p}{h} \right)_{0,5} = 36,7 \text{ кПа/м.}$$

При просмоктуванні через цей же шар повітря з температурою  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $1273 \text{ K}$ ):  $v_{1000} = 17,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ :

$$\frac{\Delta p}{h} = (17,4 \cdot 10^{-5} \cdot 1,205 \cdot 6 \cdot 10^5) w_0 \left( 1 + \frac{40}{17,4 \cdot 6} \frac{1273}{273} w_0 \right);$$

$$\frac{\Delta p}{h} = 125,8 w_0 (1 + 2,06 w_0), \text{ кПа/м,} \quad \left( \frac{\Delta p}{h} \right)_{0,5} = 127,6 \text{ кПа/м.}$$

Таким чином, для того щоб забезпечити рух через той самий пористий шар тієї ж кількості гарячого газу ( $w_0 = 0,5 \text{ м/с}$ ), потрібно збільшити перепад тиску над і під шаром більш ніж втричі.

Стосовно агломерації теоретично неможливо розрахувати ні числові значення  $P_{ш}$  і  $S_{ш}$ , ні  $r_{ш}$  і  $m$  – вони можуть бути знайдені лише за допомогою експериментальних даних. Для їх отримання необхідно провести дослідне спікання в лабораторній агломераційній чаші.

На рисунку 1.5 наведені результати вимірювання втрат напору газу в шарі, що спікається, на семи горизонтах. Також тут показана зміна швидкості всмоктуваного в шар повітря в ході досліду.

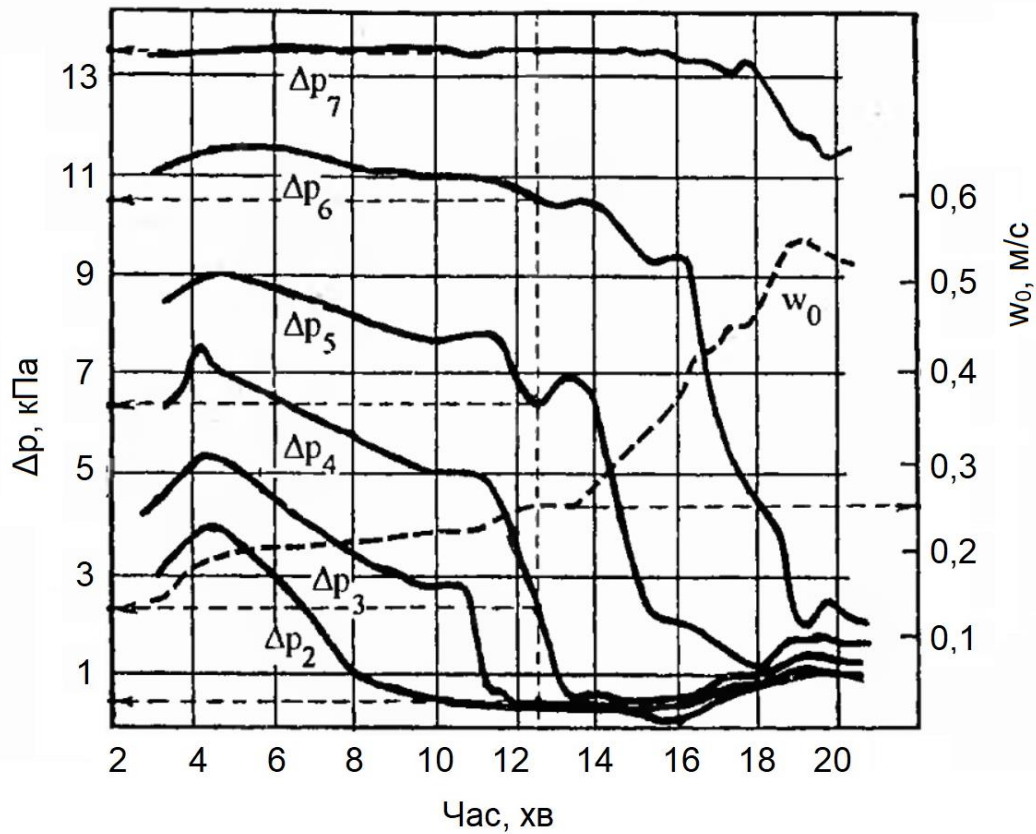


Рисунок 1.5 – Зміна втрат напору газу на окремих горизонтах шару й швидкості всмоктуваного в шар повітря в ході спікання

На рисунку 1.6 представлено «температурне поле» шару, що спікається – розподіл ізотерм в шарі у часі, побудований за експериментальними даними.

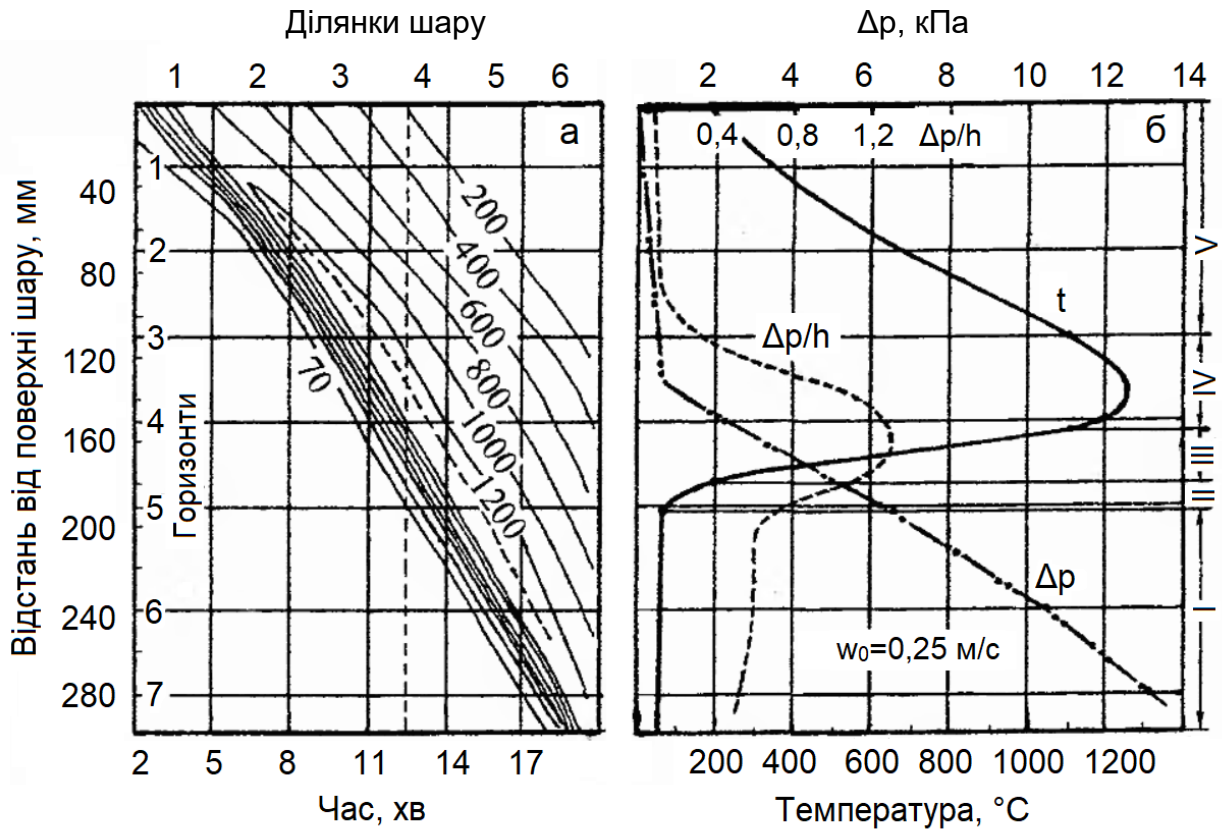


Рисунок 1.6 – Температурно-вакуумна характеристика процесу спікання агломераційної шихти:

а – розподіл ізотерм в шарі, що спікається, в ході дослід; в – розподіл за висотою шару температури і втрат напору газу на 12,5 хвилині дослід; зони: I – перезволоження; II – сушки; III – інтенсивного нагріву; IV – формування агломерату; V – агломераційний спек;  $\Delta p/h$  – градієнт втрат напору газу в шарі

За допомогою цих даних, а також рисунку 1.5 з'являється можливість визначити розподіл температур і втрат напору газу за висотою шару в будь-який вибраний момент. На рисунку 1.6,б показаний такий розподіл на 12,5 хвилині дослід.

Наведені на рисунках 1.5 і 1.6 данні дають можливість кількісно оцінити газодинамічний опір окремих зон в будь-який момент й в цілому за весь час дослід.

Задаючись температурами на межах зон, за допомогою температурної кривої на рисунку 1.6,б можна знайти висоти окремих зон та їх газодинамічний опір. Як видно з рисунка 1.6,б, максимальний питомий опір мають зони плавлення (максимальних температур) та інтенсивного нагріву. Однак, із цього не виходить, що газопроникність зон сушки й перезволоження не чинять істотного впливу на газопроникність зон інтенсивного нагріву, плавлення та всього шару в цілому, оскільки матеріал в зоні інтенсивного нагріву в значному ступені зберігає структуру зони сушки, а структура останньої залежить від структури зони перезволоження, тобто для цих трьох зон структура попередньої визначає структуру наступної зони. Отже, отримання добре огрудкованої шихти з грудками, що зберігають свою міцність при перезволоженні, сушці й високотемпературному нагріву, є основним завданням для отримання високої газопроникності шару, що спікається.

### **1.3 Газодинамічна структура зони формування агломерату**

Найбільш значуща зміна структури агломераційного шару відбувається в зоні формування агломерату при розм'якшенні і плавленні шихти.

Очевидно, що структура цієї зони визначається характером фізичних процесів, що протікають в ній.

При розгляді цих процесів варто виходити з двох принципових положень.

По-перше, агломераційна шихта як дисперсна система з порівняно високою питомою поверхнею (високою поверхневою енергією) має термодинамічну схильність до зменшення величини цієї поверхні за рахунок агрегування зерен – їх спікання. При цьому відбувається ущільнення шару, що спікається (зменшення пористості).

По-друге, характерною особливістю агломерації залізородних матеріалів методом просмоктування є температурно-теплова і хіміко-мінералогічна неоднорідність процесу, що зумовлена точковим

розташуванням в об'ємі шихти джерел виділення і поглинання тепла (коксового дрібняку, вапняку) й шматочків, що мають різний хіміко-мінералогічний склад. Це призводить до того, що процеси плавлення в зоні формування агломерату локалізовані в порівняно невеликих об'ємах шару, що чергуються з ділянками нерозплавленої шихти. Останні відіграють роль своєрідної підтримуючої решітки, що перешкоджає опусканню всього шару шихтових матеріалів й його ущільненню.

Таким чином в процесі агломерації, з одного боку, загальна пористість шару зменшується порівняно мало, а з іншого – відбувається ущільнення матеріалу в окремих об'ємах. Кінцевим результатом такого складного характеру процесів є збільшення еквівалентного діаметра каналів шару в зоні формування агломерату – покращення його газодинамічної структури.

Структура шару в зоні формування агломерату залежить від багатьох факторів: від кількості компонентів в шихті, відмінності їх хіміко-мінералогічного складу, від вмісту й крупності твердого палива, якості змішування тощо. Можна припустити, що газодинамічна структура шару в зоні формування агломерату тим краща, чим неоднорідніша шихта, крупніше паливо, що міститься в ній. І, навпаки, у міру зменшення ступеню неоднорідності шихти, збільшення вмісту в ній палива (понад оптимальний) процеси розм'якшення і плавлення матеріалу більш рівномірно розподілені в об'ємі шихти, створюються більш сприятливі умови для ущільнення всього шару в зоні формування агломерату й погіршення його газодинамічної структури.

У зв'язку з тим, що пряме експериментальне вивчення зони формування агломерату надзвичайно складне, непряму характеристику газодинамічної структури цієї зони можуть дати відповідні вимірювання шару агломерату. Для прикладу наведені криві впливу витрати палива та його крупності на газодинамічну структуру шару в зоні формування агломерату з шихти Камиш-Бурунської аглофабрики (рис. 1.7) та з високогірського концентрату (рис. 1.8).

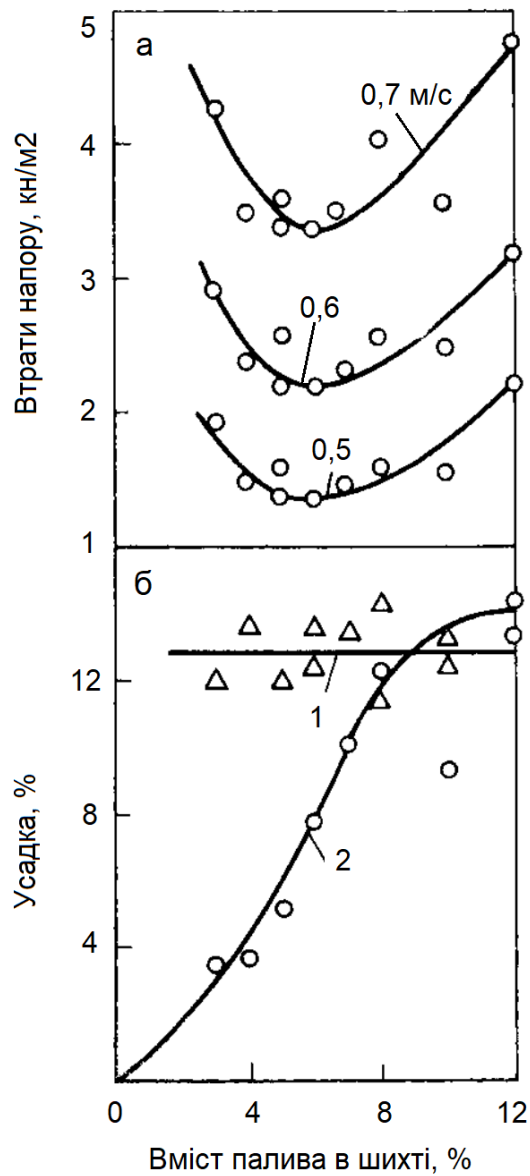


Рисунок 1.7 – Вплив вмісту палива в агломераційній шихті на газодинамічний опір пирога агломерату (а) та його усадки (б):  
 1 – усадка шихти в результаті утворення зони перезволоження; 2 – усадка пирога агломерату за рахунок процесів плавлення

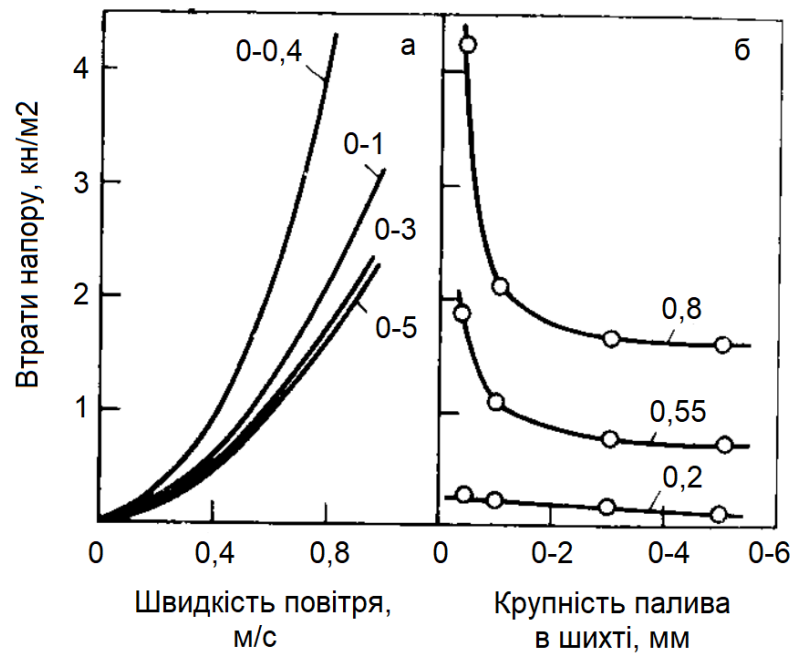


Рисунок 1.8 – Вплив крупності палива в агломераційній шихті на газодинамічні властивості пирога агломерату; числа на кривих: а – фракції коксового дрібняка, мм; б – швидкість руху повітря в шарі, м/с

Наявність рідких фаз в шарі, що спікається, чинить різноманітний вплив на процеси формування агломерату і його структуру. З одного боку, в результаті ущільнення матеріалу в ділянках плавлення та витікання розплаву відбувається збільшення розміру пор, а з іншого – розплав, що перетікає до низу, може частково або повністю заповнювати окремі пори між грудками шихти в нижніх горизонтах зони формування агломерату.

Різні дослідники по-різному оцінюють ці процеси, відмічаючи або позитивне значення розплаву, що утворюється, з точки зору покращення газодинамічної структури шару, або вказуючи на негативну роль рідких фаз.

Проте, за нормальних умов агломерації (при помірному розвитку рідких фаз) газодинамічна структура шару в зоні формування агломерату покращується у порівнянні зі структурою шихти.



Слід зауважити, що ці процеси індивідуальні для кожної шихти й закономірності зміни структури матеріалу, що агломерується, в зоні формування агломерату можуть бути отримані лише в результаті постановки експериментальних досліджень, що відкривають механізм формування залізородних агломератів.

Структура шару агломерату визначається характером процесів, що протікають в зоні формування агломерату. Для більшості матеріалів, що спікаються, в результаті перебудови, яка відбувається в зоні формування агломерату, газодинамічна структура агломерату значно відрізняється від структури вихідної шихти. Шар агломерату майже завжди має кращу газопроникність (в холодному стані), ніж шихта, з якої він отриманий. Однак, в ряді випадків, наприклад, при спіканні шихт з високою насипною масою, структура агломерату може не відрізнятися від вихідної шихти.

В таблиці 1.1 наведені коефіцієнти газодинамічного опору агломератів, отриманих в лабораторних умовах з шихт різних аглофабрик.

Таблиця 1.1 – Газодинамічна характеристика деяких агломератів

Аглофабрика	Коефіцієнти газодинамічного опору	
	$k_1 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^{-2}$	$k_2, \text{ м}^{-1}$
Череповецька	1,47	28,95
Серовська	3,20	16,60
Камиш-Бурунська	0,12	25,10
	0,1	20,40
Високогірська: концентрат 0–0,2 мм; крупність палива, мм:		
0–0,4	4,0	339,0
0–3,0	2,20	80,20
Високогірська: концентрат 0–0,2 мм; крупність палива, мм:		

0–0,4	0,44	32,90
0–1,0	1,76	15,0
0–3,0	1,64	11,50
0–5,0	1,51	11,20

В першому приближенні шар агломерату можна вважати однорідним. Однак, при більш точних розрахунках в ряді випадків необхідно враховувати можливу відмінність газодинамічної структури агломерату на окремих горизонтах, обумовлену неоднорідністю структури вихідної шихти і різними температурно-тепловими умовами процесу за висотою шару, що спускається (рис. 1.9).

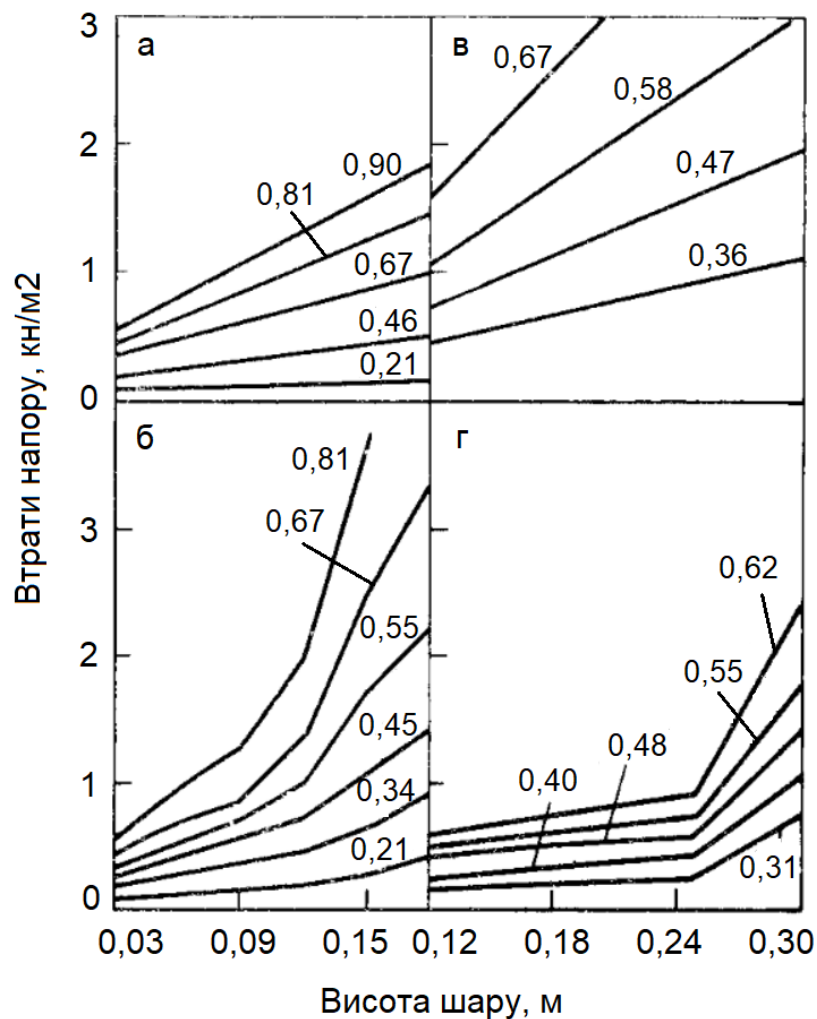


Рисунок 1.9 – Розподіл вакууму за висотою пирога охолодженого агломерату:

а – з високогірського концентрату крупністю  $-0,2$  мм при крупності палива  $0-3$  мм; б – з високогірського концентрату крупністю  $-0,2$  мм при крупності палива  $0-0,4$  мм; в – з агломерату з шихт Череповецької аглофабрики; г – з агломерату Камиш-Бурунської аглофабрики; числа на кривих – швидкість руху повітря в шарі, м/с

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ УСАДКИ ШАРУ, ЩО СПІКАЄТЬСЯ

### 2.1 Розрахунок усадки агломераційної шихти в умовах рівноваги діючих в шарі сил

Газопроникність початкового аглошару шихти чинить значний вплив на газодинаміку процесу спікання й, отже, на продуктивність агломераційної установки. Як універсальний показник, що дозволяє порівняти газопроникність шихт різних фабрик, оцінювати вплив на газопроникність різних факторів стадії підготовки шихти до спікання тощо, пропонується використовувати коефіцієнти газодинамічного опору  $k_1$  і  $k_2$ .

Проте, як показали дослідження, коефіцієнти  $k_1$  і  $k_2$  не однозначно відображають газодинамічні властивості початкової шихти. Величина їх, за інших рівних умов, залежить, наприклад, від таких параметрів, як висота шару шихти та/або перепад тиску просмоктуваного повітря. Додатковим чинником в цьому випадку, є механічна дія газового потоку, що викликає часткове руйнування грудок шихти і зниження порозності агломераційного шару в результаті його усадки.

Для оцінки початкової газопроникності шихти в різних умовах формування і теплової обробки аглошару необхідно вміти розрахунковим шляхом корегувати коефіцієнти газодинамічного опору, використовуючи з цією метою показники механічної міцності матеріалу шару і параметри, що характеризують зміну його структури. Одним з таких параметрів є усадка шару, пов'язана через порозність з коефіцієнтами  $k_1$  і  $k_2$ . Для вихідного шару, в якому масообміном можна знехтувати, залежність між порозністю шару  $m_{ш}$  і його усадкою у запишеться таким чином:

$$m_{ш} = 1 - \frac{1 - m_{п}}{1 - y}, \quad (2.1)$$

де  $m_{п}$  – початкове (до усадки) значення порозності шару.

Підставивши залежність (2.1) у вирази для коефіцієнтів  $k_1$  і  $k_2$ , одержані з рівняння Дарсі-Вейсбаха, після нескладних перетворень можна визначити

відносні значення коефіцієнтів газодинамічного опору залежно від зменшення порозності шару при його усадці:

$$\frac{\Delta k_1}{k_1} = \frac{1-y}{(1-y/m_n)^3} - 1; \quad \frac{\Delta k_2}{k_2} = \frac{1-y}{(1-y/m_n)^3} - 1, \quad (2.2)$$

Наприклад, при  $y = 0,04$  (4%) і  $m_n = 0,4$  відносні зміни коефіцієнтів газодинамічного опору складають:  $\Delta k_1/k_1 = 0,32$  (32%),  $\Delta k_2/k_2 = 0,26$  (26%).

Таким чином, усадка шару характеризує зміну коефіцієнтів його газодинамічного опору. В даному випадку вона пов'язана, перш за все, з дією в шарі додаткового навантаження у вигляді перепаду тиску просмоктуваного повітря й при відомих механічних властивостях матеріалу може бути розрахована за рівняннями механіки суцільного середовища.

У рівноважних умовах між навантаженням зрзка шихти  $\sigma$  і ступенем його ущільнення  $\alpha$  існує нелінійна залежність, яка добре апроксимується степеневою функцією наступного виду:

$$\sigma = P_0[(1 - \alpha)^{1/n} - 1], \quad (2.3)$$

де  $P_0$  і  $n$  – сталі для шихти з певною вологістю.

Так само, як насипна маса  $\rho_n$  і порозність  $m$ , ступінь ущільнення шихти є параметром стану середовища і характеризує можливість або завершеність процесу протікання необоротних усадкових явищ в шарі. Всі три параметри зв'язані між собою наступними співвідношеннями:

$$\rho_n = \rho_{n0}/(1 - y_m \alpha); \quad (2.4)$$

$$m = 1 - (1 - m_0)/(1 - y_m \alpha), \quad (2.5)$$

де насипна маса  $\rho_{n0}$  і порозність шару  $m_0$  відповідають стану неуцільненої шихти при  $\alpha = 0$ .

Нижче наводиться методика розрахунку квазістатичної (рівноважної) усадки агломераційної шихти за висотою шару при просмоктуванні через нього газу (повітря). У розрахунку прийняті наступні припущення:

1) відповідно до принципів класичної механіки суцільного середовища шар агломераційної шихти розглядається як суцільне тіло, що має властивості

однорідності й ізотропії. Всі взаємодії в шарі є статистичними середніми їх дійсного розподілу;

2) розглядається тільки кінцевий стан середовища, коли процес усадки завершений і сили, що діють в шарі, знаходяться в рівновазі;

3) в якості моделі шару для розрахунку газодинаміки прийнятий фіктивний шар, що складається з частинок сферичної форми однакового еквівалентного діаметру  $d_e$ . Розподіл перепаду тиску за висотою шару визначається зміною його порозності;

4) величина максимально можливої усадки неущільненої шихти дорівнює її порозності, тобто  $V_m = m_0$  (об'ємним стисненням зерен матеріалу нехтуємо).

Рівняння рівноваги сил в нерухомому шарі шихти при просмоктуванні через нього повітря зверху вниз запишемо у вигляді:

$$-d\sigma/dh + \gamma + dP/dh = 0, \quad (2.6)$$

де  $\sigma$  – величина діючої в шарі напруги (навантаження), Н/м<sup>2</sup>;

$h$  – координата по висоті шару, починаючи з його поверхні, м;

$P$  – тиск повітря, Н/м<sup>2</sup>;

$\gamma$  – питома вага шихти на даному горизонті шару, Н/м<sup>3</sup>.

Диференціюючи (2.3) по  $h$  і підставляючи одержаний вираз і співвідношення (24) в (2.16), отримуємо:

$$\frac{P_0}{n} (1 - \alpha)^{\frac{1-n}{n}} \frac{d\alpha}{dh} + \frac{\gamma_0}{1 - Y_m \alpha} + \frac{dP}{dh} = 0, \quad (2.7)$$

де  $\gamma_0 = \text{gr}_{n0}$  – питома вага неущільненої шихти, Н/м<sup>3</sup>.

Для розрахунку розподілу перепаду тиску за висотою шару використовували залежність Ергуна:

$$\frac{dP}{dh} = \left[ 150 \frac{1-m}{Re} + 1,75 \right] \frac{1-m}{m^3} \frac{W^2}{d_e^3} \rho_\Gamma; \quad (2.8)$$

де  $Re$  – критерій Рейнольдса;

$W$  – швидкість фільтрації повітря на вільний перетин, м/с;

$d_e$  – еквівалентний діаметр гранул шихти, м;

$\rho_\Gamma$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$m$  – порозність шихти на даному горизонті за висотою шару.

З урахуванням (2.8), в якому порозність шихти визначається залежністю (2.5), диференціальне рівняння (2.7) є нелінійним, і розв'язати його можна чисельними методами. Розв'язок (2.7) одержаний за кінцево-різницевою схемою Адамса у вигляді залежності  $\alpha$  від безрозмірного комплексу величин  $\frac{\gamma_0}{P_0} h$ . Порівняння результатів наближеного і точного розв'язку для випадку відсутності просмокування повітря показало їх гарний збіг.

Питома усадка шару  $y$  пов'язана із ступенем ущільнення шихти залежністю:

$$y = \frac{\gamma_m(\alpha_w - \alpha_0)}{1 - \gamma_m \alpha_0} = \frac{\gamma_m \Delta \alpha}{1 - \gamma_m \alpha_0}, \text{ відн. од.}; \quad (2.9)$$

де  $\alpha_0$  і  $\alpha_w$  – ступені ущільнення, відповідно, вихідної шихти ( $W=0$ ) і тієї ж шихти, але після просмокування повітря;

$\Delta \alpha$  – зміна (перепад) ступеня ущільнення шихти на даному горизонті шару, викликана просмокуванням повітря.

Загальна усадка шару шихти визначається інтеграцією питомої усадки  $y$  по висоті шару  $H$ :

$$y = \frac{1}{H} \int_0^H y(h) dh, \text{ відн. од.} \quad (2.10)$$

Розглянемо взаємозв'язок усадки шихти з показниками її механічної міцності на прикладі розрахунку ущільнення шару з середньою крупністю гранул  $d_e = 0,001$  м при просмокуванні через нього повітря з температурою  $20$  °С. Результати чисельної інтеграції рівняння (2.7) спільно з граничною умовою  $\sigma_{h=0} = 0$  представлені на рисунках 2.1–2.13. Рисунок 2.1 ілюструє залежність ступеня ущільнення шихти  $\alpha$  від безрозмірного параметра  $\frac{\gamma_0}{P_0} h$  при різних значеннях показника ступеня  $n$  в рівнянні (2.3). Як видно з рисунка 2.1, просмокування повітря ущільнює шихту ( $\alpha_w > \alpha_0$ ), причому перепад  $\Delta \alpha = \alpha_w - \alpha_0$  по висоті шару, починаючи з його поверхні, змінюється від нуля. Так само, як і  $y$  у разі вихідної шихти, ступінь ущільнення шихти після просмокування повітря по висоті шару ( $h \rightarrow \infty$ ) плавно зростає, асимптотично наближаючись

до одиниці. При фіксованому значенні параметрів  $\frac{\gamma_0}{P_0} h$  ступінь ущільнення шихти тим більше, чим менше  $n$  у визначальному рівнянні (2.3) матеріалу шару.

Враховуючи прямий зв'язок питомої усадки з перепадом  $\Delta\alpha$  представляє інтерес прослідкувати залежність останнього від основних факторів описуваного явища. Аналіз даних, приведених на рисунку 2.2, показує, що для шихти з певними фізико-механічними властивостями ( $d_e, \gamma_0, P_0, U_m, n = \text{const}$ ) залежність питомої усадки від висоти шару при  $h \rightarrow \infty$  має екстремальний характер, причому швидкість зміни питомої усадки по висоті шару, величина і розташування по висоті шару максимуму усадки обумовлені, як фізико-механічними властивостями шихти, так і загальним перепадом тиску газу, що викликає певну швидкість фільтрації останнього через шар. Зменшення питомої усадки шихти після досягнення максимуму по висоті шару пояснюється значним ущільненням початкової шихти нижніх пластів шару під дією ваги вищерозміщених пластів, а значить і меншою її усадкою при просмоктуванні повітря. Якщо  $P_0$  і  $n$  безпосередньо визначають механічну міцність шару шихти і збільшення  $P_0$  і  $n$  спричиняє зменшення  $\Delta\alpha$  (рис. 2.2, а), та дія  $U_m$  (рис. 2.2, б) пояснюється зв'язком цієї величини з порозністю і газодинамічним опором шару [формули (2.5) і (2.8)]. У останньому випадку збільшення  $U_m$  викликає зменшення  $\Delta\alpha$  не за рахунок підвищення міцності шихти, а за рахунок зменшення силового тиску на неї з боку просмоктуваного повітря при відповідному збільшенні порозності шару.

На рисунку 2.3 представлена залежність загальної усадки  $U$  шару висотою  $H$  від перепаду тиску просмоктуваного повітря  $\Delta P$  для різних значень параметра  $\frac{\gamma_0}{P_0} H$  (варіант розрахунку при  $n = -0,3, U_m = 0,4$ ). З рисунка 2.3 видно, що усадка шару зростає із збільшенням перепаду тиску, проте швидкість цього процесу  $dU/d(\Delta P)$  значна тільки для перших 10 кПа інтервалу зміни перепаду тиску і у міру збільшення  $\Delta P$  поступово падає.



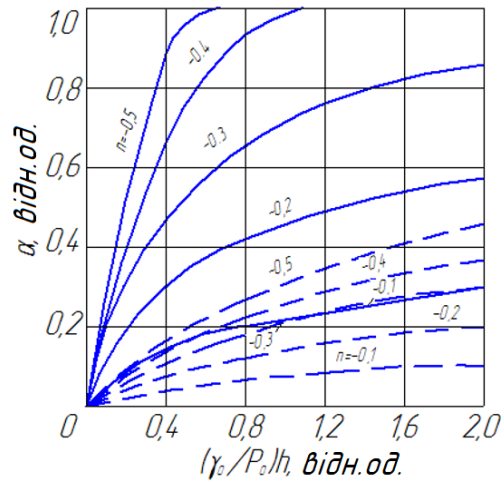


Рисунок 2.1 – Залежність ступеня ущільнення шихти  $\alpha$  від безрозмірного параметра  $\frac{\gamma_0}{P_0}h$  при різних значеннях показника ступеня  $n$  в рівнянні (2.3)

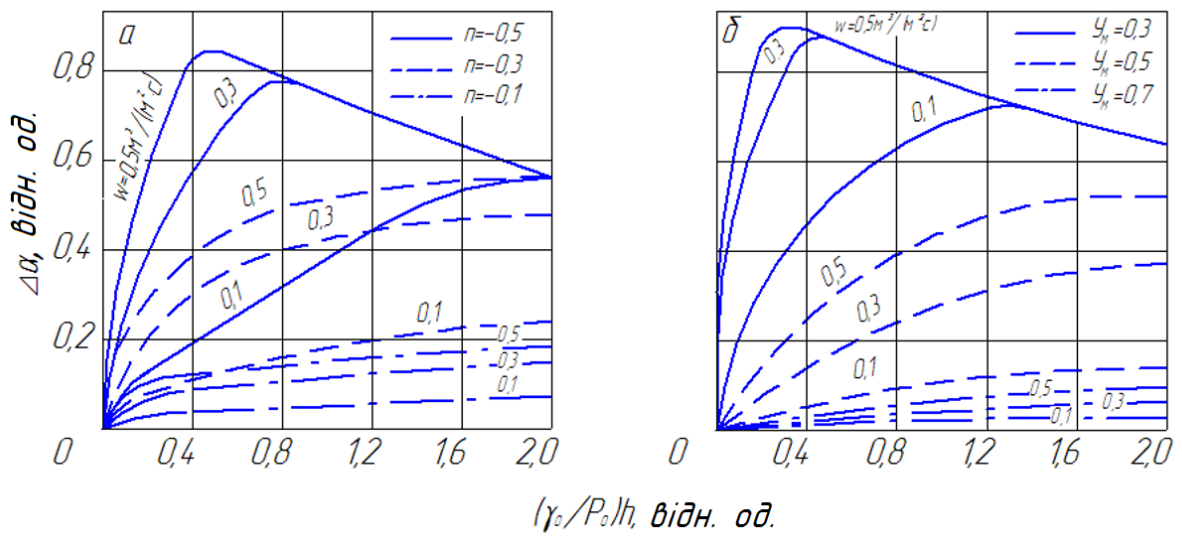


Рисунок 2.2 – Залежність  $\Delta\alpha$  від параметра  $\frac{\gamma_0}{P_0}h$  при різних значеннях  $n$  (а) и  $U_m$  (б). Цифри біля кривих – швидкість просмокування повітря,  $m^3/(m^2 \cdot c)$

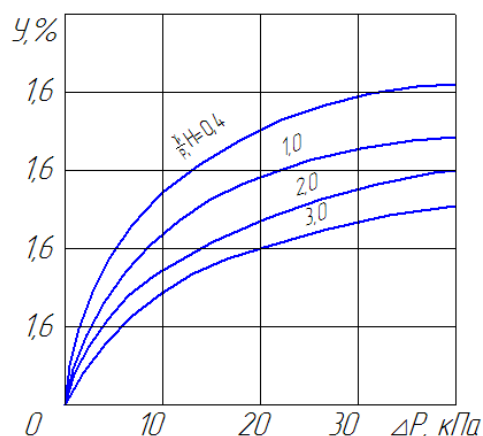


Рисунок 2.3 – Залежність загальної усадки  $U$  шару шихти висотою  $H$  від перепаду тиску просмоктуваного повітря  $\Delta P$  при різних значеннях  $\frac{\gamma_0 H}{P_0}$

Відмічена особливість пояснюється зміцненням шару шихти при збільшенні його усадки. Один і той же перепад тиску просмоктуваного повітря викликає більш значну відносну усадку шихти в шарі меншої висоти.

Описана методика розрахунку квазістатичної усадки шару агломераційної шихти при просмоктуванні через нього повітря може служити так само, як термодинамічні розрахунки рівноважних перетворень в хімічних реакціях, моделлю рівноважного стану даної системи, пов'язуючи ступінь ущільнення шихти з факторами, що визначають умови протікання усадкових явищ в початковому періоді процесу агломерації.

Реальний процес усадки шихти при підвищенні розрідження у вакуум-камері агломашини відрізняється від рівноважного, оскільки на нього значною мірою накладаються різні часові ефекти, пов'язані з дією інерційних сил, впливом тертя і в'язкості структурних зв'язків частинок шихти в шарі. Він може бути доведений до рівноважного тільки при достатньо малій швидкості зміни розрідження у вакуум-камері, тобто так, щоб і для проміжних станів системи дотримувалася умова рівноваги сил (2.6).

Таким чином, при зміні умов руху газу (повітря) в шарі агломераційної шихти коефіцієнти газодинамічного опору  $k_1$  і  $k_2$  необхідно коректувати, використовуючи з цією метою показники механічної міцності матеріалу шару

і параметри, що характеризують зміни його структури. Одним з параметрів, що визначає зміну  $k_1$  і  $k_2$ , є усадка шару, яка при відомих механічних властивостях шихти може бути розрахована за рівняннями механіки суцільного середовища. Розрахунок ущільнення шару при просмоктуванні через нього повітря показав, що ступінь ущільнення шихти плавно зростає з глибиною її залягання в шарі, тоді як аналогічна залежність питомої усадки шихти від висоти шару має екстремальний характер. Усадка шару зростає при збільшенні перепаду тиску просмоктуваного повітря, але один і той же перепад викликає значнішу відносну усадку шихти в шарі меншої висоти.

## **2.2 Дослідження усадки агломераційної шихти при дії ущільнюючого навантаження**

Вивчення усадки шару агломераційної шихти в процесі спікання вимагає знання механічних характеристик матеріалу. На відміну від поширеної в агломерації методики дослідження механічних властивостей шихти, заснованої на визначенні міцності окремих гранул при роздавлюванні, дана робота використовує методи механіки суцільного середовища, коли характерні розміри випробовуваного зразка шихти у багато разів більше лінійних розмірів гранул.

Дослідження проводили на лабораторній установці, що включає закріплені на рамі жорсткий циліндр, поршень з гвинтовим механізмом переміщення, індикатор переміщення годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм і зразковий динамометр ДОСМ-3-01.

Випробовувану огрудковану агломераційну шихту поміщали без зміни в жорсткий циліндр. Стискаючи матеріал поршнем, за показаннями приладів будували залежності між тиском поршня  $P$  (Н/м<sup>2</sup>) та усадкою матеріалу  $Y$  (відн. од.) в процесі навантаження  $Y = Y_1(P)$ , при подальшому розвантаженні  $Y = Y_2(P)$ , в процесі повторного навантаження  $Y = Y_3(P)$ , і т.д. Досліджували агломераційну шихту наступного хімічного складу: концентрат

(криворізький) – 33%; аглоруда – 27%; вапняк – 20%, коксик – 3%; повернення – 17% при зміні ущільнюючого навантаження в межах 0–70 кПа, вологості шихти 1–10%.

Встановлено, що процес усадки вихідної агломераційної шихти під впливом ущільнюючого навантаження визначається в основному необоротною (пластичною) деформацією. Залежність  $Y = Y_l(P)$  апроксимується ступеневою функцією:

$$Y = Y_m [1 - (P/P_0 + 1)^n], \quad (2.11)$$

де  $Y_m$  – максимально можлива усадка неуцільненої агломераційної шихти;

$P_0$  і  $n$  – параметричні постійні, що визначають хід залежності.

Значення постійних  $Y_m$ ,  $P_0$  та  $n$  у вказаному діапазоні зміни вологості представлені на рисунку 2.4. Безрозмірний параметр  $\alpha = Y/n$  може характеризувати, таким чином, стан шихти (ступінь її ущільнення) на будь-якому горизонті шару.

Оборотна складова усадки шихти обумовлена пружною деформацією зерен матеріалу і нелінійно залежить від  $P$ . При багатократних навантаженнях-розвантаженнях спостерігається характерне для реальних сипких матеріалів явище гістерезису – криві навантаження і розвантаження утворюють петлі. В цілому пружна деформація агломераційної шихти по абсолютній величині складає всього 1–3% (відн.) від загальної усадки, вона залежить від вологості шихти і в інтервалі навантажень  $P = 0–30$  кПа може характеризуватися середнім модулем пружності  $E = 4500–5500$  кПа.

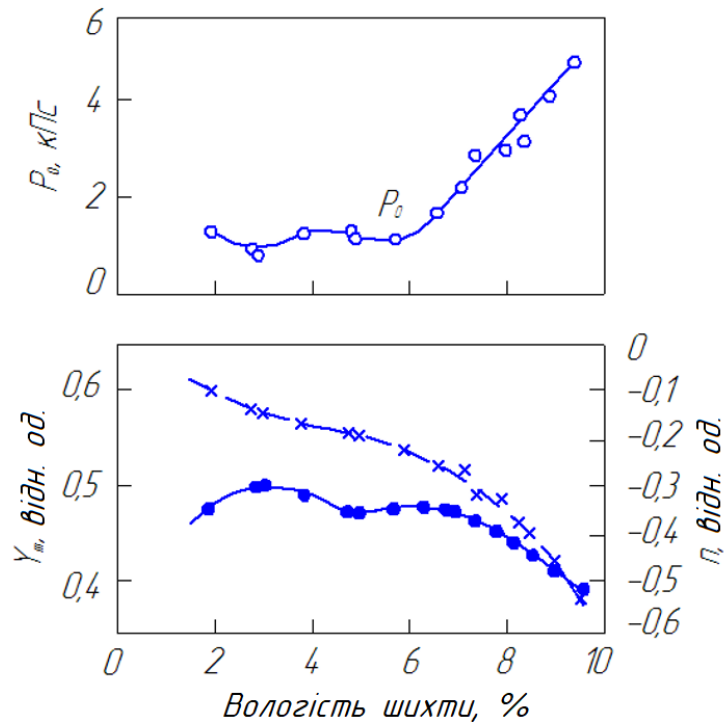


Рисунок 2.4 – Залежність  $Y_m$ ,  $P_0$  і  $n$  від вологості шихти

Як приклад використання одержаних результатів розглянемо ущільнення шихти по висоті шару під дією власної ваги. Умову рівноваги сил в нерухомому шарі шихти запишемо у вигляді:

$$-d\sigma/dH + \gamma = 0, \quad (2.12)$$

де

$$\gamma = \gamma_0 / (1 - \gamma_m \alpha); \quad (2.13)$$

$$\alpha = 1 - (\sigma/P_0 + 1)^n; \quad (2.14)$$

де  $\gamma$  – діюча в шарі напруга (навантаження), Н/м<sup>2</sup>;

$H$  – координата по висоті шару починаючи від його поверхні, м;

$\gamma_0$ ,  $\gamma$  – питома вага неущільненої шихти й шихти на даному горизонті шару, Н/м<sup>3</sup>.

Диференціюючи (2.14) і підставляючи одержаний вираз і залежність (2.13) в рівняння (2.12), одержимо:

$$\frac{P_0}{n} (1 - \alpha)^{\frac{1-n}{n}} \frac{d\alpha}{dH} + \frac{\gamma_0}{1 - \gamma_m \alpha} = 0, \quad (2.15)$$

Розділяючи змінні і інтегруючи спільно з початковою умовою  $\sigma_{H=0} = \sigma_0$ , маємо остаточно:

$$\left(1 - Y_m \frac{n}{1+n}\right) \left[ (1 - \alpha)^{1/n} - 1 - \frac{\sigma_0}{P_0} \right] - Y_m \frac{\alpha}{1+n} (1 - \alpha)^{1/n} + \left( \frac{\sigma_0}{P_0} + 1 \right) Y_m \frac{1 - \left( \frac{\sigma_0}{P_0} + 1 \right)^n}{1-n} = \frac{\gamma_0}{P_0} H \quad (2.16)$$

Розв'язок рівняння (2.16) в координатах безрозмірних параметрів  $\alpha, \frac{\gamma_0}{P_0} H$  за відсутності початкового ущільнення шихти ( $\sigma_0 = 0$ ) представлено на рисунку 2.5. Якщо  $\sigma_0 \neq 0$ , полюс кривих  $n = \text{const}$  на осі ординат зміщується в точку  $\alpha_0 = 1 - (\sigma_0/P_0 + 1)^n$ . Хід кривих аналогічний приведеним на рисунку 2.5.

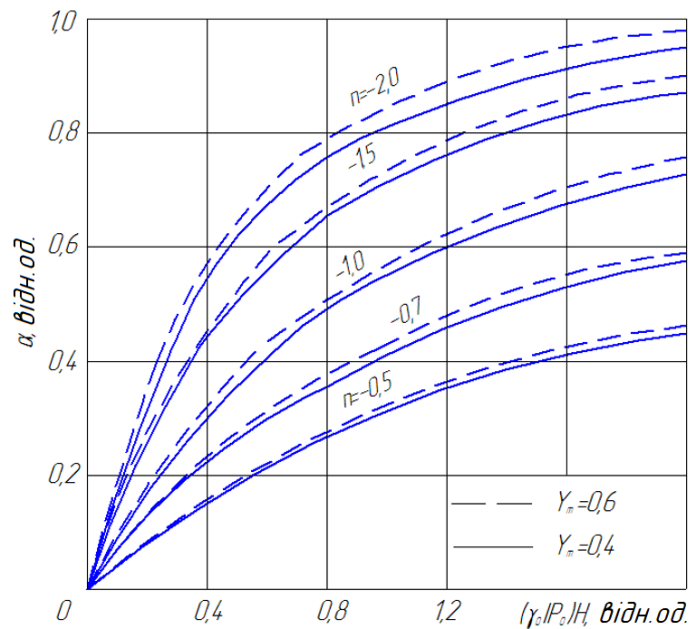


Рисунок 2.5 – Залежність ступеня ущільнення шихти  $\alpha$  від безрозмірного параметра  $\frac{\gamma_0}{P_0} H$

Аналіз розв'язку рівняння (2.16) показує, що ступінь ущільнення шихти плавно збільшується з глибиною її залягання в шарі і при  $H \rightarrow \infty$  симетрично наближається до одиниці. Характер такого явища повністю визначається фізико-механічними властивостями шихти ( $\gamma_0, Y_m, P_0, n$ ). В межах значень  $Y_m = 0,4-0,6$ , звичайних для агломераційних шихт, вплив цього параметра на ступінь ущільнення незначний.

Процес усадки агломераційної шихти при спіканні значно диференційований по висоті шару. Як впливає з вищесказаного, умови такої диференціації складаються вже в процесі формування шару шихти на палетах агломашини. У цьому випадку рівняння (2.16) може слугувати для аналізу розподілу густини, порозності  $i$ , отже, початкової газопроникності шихти по висоті шару, оскільки густина (насіпна маса) шихти  $\rho_H = \gamma/g$  (кг/м<sup>3</sup>) пов'язана із ступенем ущільнення рівнянням (2.13), а порозність  $m$  – співвідношенням:

$$m = 1 - \frac{1-m_0}{1-Y_m\alpha}, \quad (2.17)$$

де  $m_0$  – порозність шару, що відповідає стану неуцільненої шихти ( $\alpha = 0$ ).

Газопроникність шару звичайно характеризується залежністю питомого газодинамічного опору шихти  $dP/dH$  від швидкості фільтрації газу  $W$ . Використовуючи для цієї мети, наприклад, залежність Ергуна:

$$\frac{dP}{dH} = \left[ 150 \frac{1-m}{Re} + 1,75 \right] \frac{1-m}{m^3} \frac{W^2}{d} \rho_r, \quad (2.18)$$

де,  $d$  – середній (ефективний) діаметр гранул шихти, м;

$\rho_r$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;

$Re$  – критерій Рейнольдса, і враховуючи співвідношення (2.17), можна розрахувати відповідно до рівняння (2.16) зміну  $dP/dH$  по висоті шару.

Для вихідної шихти втрати натиску газу змінюються по висоті шару непропорційно – нижні пласти шихти чинять більший опір. Характер такої зміни обумовлений зміною по висоті шару ступеня ущільнення шихти.

Таким чином, процес усадки агломераційної шихти під дією ущільнюючого навантаження описується ступеневою функцією  $Y = Y_m [1 - (P/P_0 + 1)^n]$ . Інша деформація агломераційної шихти складає 1–3% (відн.) від загальної усадки і в інтервалі навантажень  $P = 0–30$  кПа характеризується середнім модулем пружності  $E = 4500–5500$  кПа.

Ущільнення шихти під дією власної ваги плавно збільшується з глибиною залягання в шарі. Характер зміни щільності визначається фізико-механічними властивостями шихти ( $\gamma_0, Y_m, P_0, n$ ).

### **З ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ СПІКАННЯ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ ШИХТИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПІДТРИМУЮЧИХ СТРИЖНІВ**

Швидкість газового потоку під час процесу спікання залежить від газопроникності аглошару на всій довжині стрічки. Волога верхніх горизонтів, що конденсується на нижніх горизонтах, призводить до збільшення газодинамічного опору шару [1–3]. Насьогодні розроблено багато методик покращення проникності шару, що спікається [4,5].

З іншого боку, по мірі ходу спікання зона горіння-плавлення збільшується і опір газовому потоку також збільшується, що в свою чергу уповільнює швидкість спікання [2,6].

Як причини збільшення опору шару розглядались зона горіння-плавлення, збільшення об'єму газу при нагріванні й закупорювання газових каналів утвореним розплавом фериту кальцію і розплавом силікатів [2]. Перше є принципово зрозумілим й можна теоретично припустити ступінь опору. Проте останні причини недостатньо вивчені й потребують детального аналізу структури зони горіння-плавлення.

Вважалось, що сила стискання, викликана гравітацією, чинить значний вплив на формування структури агломерату, особливо в нижніх горизонтах шару, що спікається [7]. В роботі [8] увага зосереджена на впливі навантаження сформованого аглоспеку на зону горіння-плавлення і проникність шару та було запропоновано метод «магнітно-левітаційного спікання» під дією магнітної сили. Подальший вплив навантаження аглоспеку на проникність шару, структурні зміни порових каналів, що утворюються при спіканні, вивчався з використанням аналітичного методу комп'ютерної томографії [9].

Виходячи з цього великий практичний інтерес становить технологія спікання агломерату з використанням конструкцій, підтримуючих навантаження вже сформованого аглоспеку.



### 3.1 Лабораторні дослідження факторів, що впливають на усадку шару при спіканні

Були проведені дослідні спікання шихти в аглочаші зі стрижнями. Агломераційна шихта піддавалась спіканню в чаші діаметром 300 мм при сталому тиску всмоктування 19,6 кПа. На рисунку 3.1 показано стрижні для підтримки шару аглошихти, виготовлені у вигляді бруса (а) та пластини (б) та встановлені на решітці аглочаші. Висота шару шихти складала 750 мм, а висота стрижнів, що використовувались, складала 200, 400 та 600 мм. Спікання проводилось під додатковим навантаженням. Для цього до поверхні агломераційного шару було прикладене високе гідравлічне навантаження (0,15 МПа).

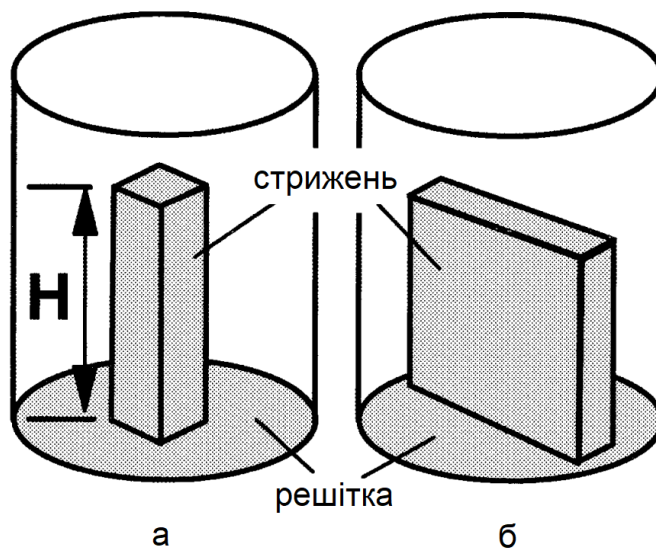


Рисунок 3.1 – Принципова схема аглочаші з встановленим стрижнем:  
а – у вигляді бруса; б – у вигляді плити

На рисунку 3.2 наведений приклад стрижнів у вигляді пластини, встановлених на решітці спікальних візків під час дослідних випробувань на агломераційній машині.

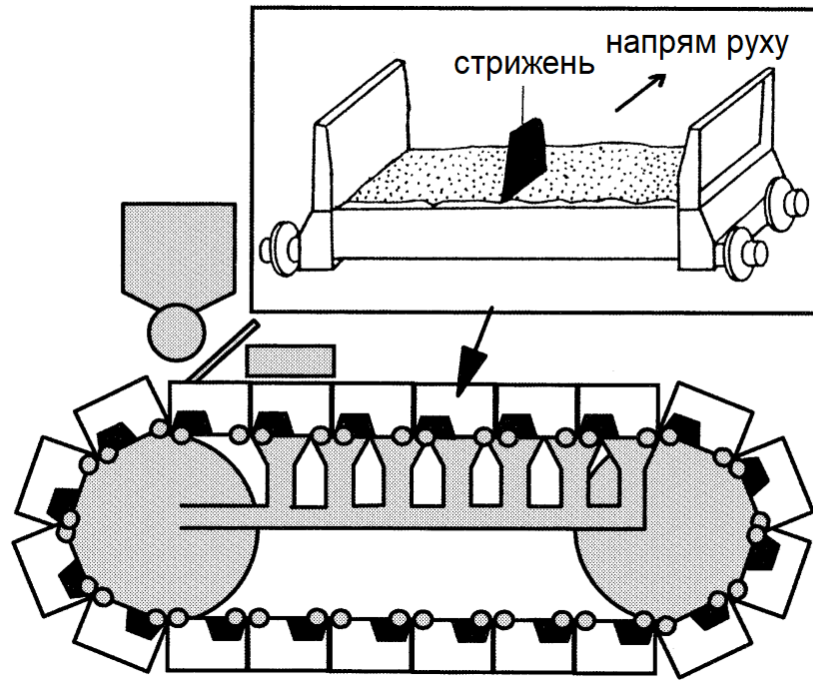


Рисунок 3.2 – Принципова схема розташування стрижнів на решітці спікальних візків

Перед початком промислових випробувань на агломераційній машині решітки деяких спікальних візків були замінені на решітки зі стрижнями. В ході випробувань використовувались стрижні різної висоти для визначення їх оптимальної висоти. В цій роботі «високими стрижнями» називаються стрижні, що мають висоту, більшу за половину висоти шару аглошихти. «Низькі стрижні» – це, відповідно, стрижні, що мають висоту, меншу за половину висоти шару аглошихти. При звичайному режимі спікання висота агломераційного шару складала від 500 до 600 мм.

Усадку шару під час спікання визначали безпосередньо у п'яти точках за шириною візка за допомогою натягнутого між його боковими стінками дроту. Швидкість газового потоку на поверхні агломераційного шару вимірювали у трьох точках в напрямку ширини візка. Також вимірювались температура й склад газів, що відходять з шару. Окрім того, після спікання були відібрані

зразки агломератів з візків зі стрижнями та з візків без них та визначена їх відновлюваність та пористість.

В таблиці 3.1 наведені результати дослідних спікань в аглочаші. При використанні стрижнів спостерігалось різке скорочення часу спікання. Найменшим було скорочення часу при використанні стрижнів висотою 200 мм. Слід відзначити, що час спікання збільшувався пропорційно до прикладеного до поверхні шару тиску. Вихід придатного агломерату суттєво не змінювався і складав 80,3–82,1%. При цьому продуктивність аглоустановки була збільшена майже на 20%.

Таблиця 3.1 – Результати спікань в аглочаші

Варіанти спікання	Час спікання, хв	Усадка, мм	Вихід придатного, %	Продуктивність, т/доб·м <sup>2</sup>
З додатковим навантаженням	46,9	130	81,5	35,7
Базове	39,7	99	82,1	41,9
Зі стрижнями				
Брус Н=200 мм	37,6	80	83,0	44,4
Брус Н=400 мм	33,4	58	80,9	49,6
Брус Н=600 мм	34,1	34	82,0	47,4
Плита Н=200 мм	36,9	73	81,2	43,7
Плита Н=400 мм	31,7	50	81,8	50,6
Плита Н=600 мм	32,4	23	80,3	48,5

Час спікання точно відповідав усадці шару. Це свідчить про те, що частка порожнин в шарі, що спікається, чинить значний вплив на проникність шару. В роботі [11] показано два фактори усадки: об'єм розплаву як функцію коефіцієнта плавлення аглошихти й текучість розплаву як функцію хімічного складу агломерату. В роботі [12] виділяють два типи усадки в процесі

спікання: на мікро- та макрорівні. Показано, що основним фактором усадки на макрорівні є течія рідкого розплаву.

Отже, дане дослідження наочно демонструє, що навантаження на зону горіння-плавлення є основним фактором усадки шару.

### 3.2 Розробка та дослідження властивостей підтримуючих стрижнів

Перед встановленням стрижнів на агломераційній машині були проведені випробування матеріалів, форми та розташування стрижнів на решітці спікальних візків.

На рисунку 3.3 представлені результати вимірювання усадки агломераційного шару при різних компонуваннях стрижнів. Зміна висоти аглошару вимірювалась над стрижнем (P1), між стрижнем та бортом візка (P2) або між двома стрижнями (P3). При нормальній роботі агломашини без стрижнів загальна усадка шару, що спікається, складала приблизно 100 мм при початковій висоті шару 550 мм.

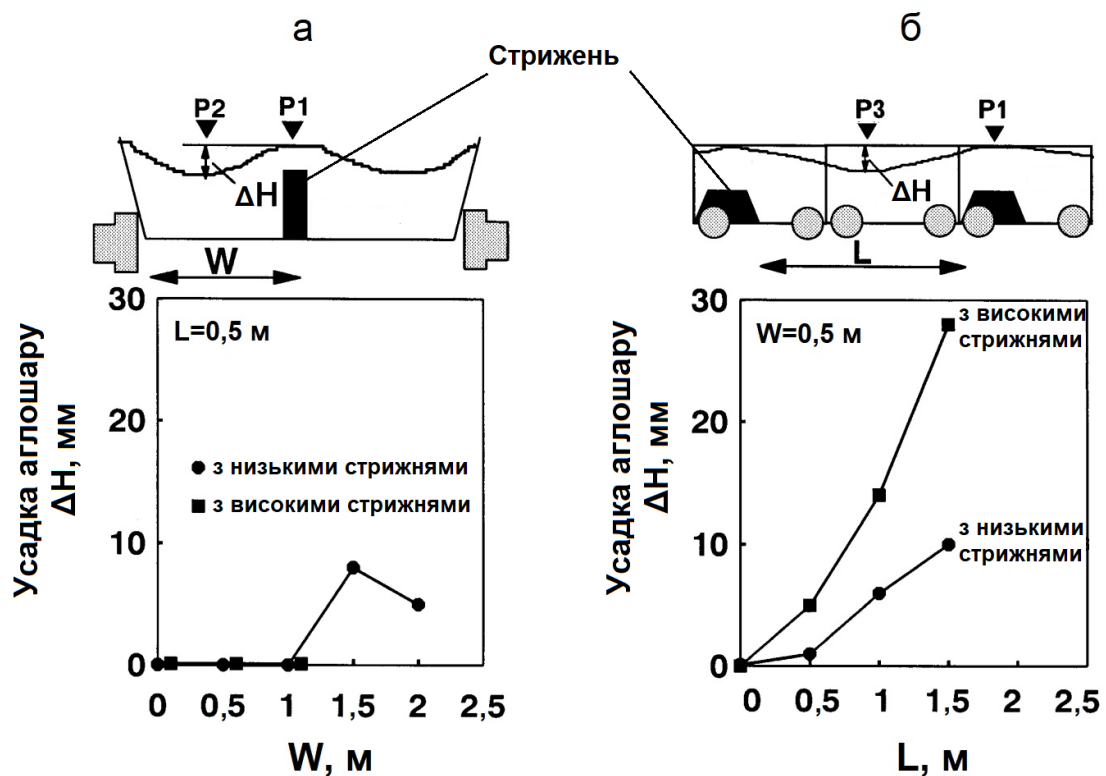


Рисунок 3.3 – Зміна усадки агломераційного шару в залежності від відстані між стрижнями:

а – по ширині аглострічки; б – по довжині аглострічки

Невелика різниця по висоті агломерату між двома стрижнями ( $\Delta H$ ) свідчить про те, що вони підтримують агломераційний шар однорідно.

Перепад висоти агломерату зростав при збільшенні відстані між стрижнями як за шириною (рис. 3.3, а), так і за довжиною агломераційної стрічки (рис. 3.3, б). Це свідчить про те, що агломерат не поводить себе як повністю твердий матеріал. Однак при правильному розташуванні стрижнів була отримана практично рівномірна усадка, при якій перепади висоти аглошару по всій стрічці не перевищували 10 мм. Витрата газу в аглошарі в цьому випадку також була однорідною.

Для безперешкодного вивантаження аглоспеку після спікання стрижні були розташовані в задній частині візків за напрямом аглострічки (рис. 3.2).

Також був досліджений матеріал для виготовлення стрижнів. На рисунку 3.4 наведені результати термометричних випробувань зміни температури високого стрижня під час спікання. Коли фронт зони горіння досяг верхньої частини (S1) стрижня (через 13,7 хв після запалювання), температура верхньої частини стрижня почала зростати й досягла 700 °С. Температура нижньої частини (S4) стрижня при цьому залишалась низькою.

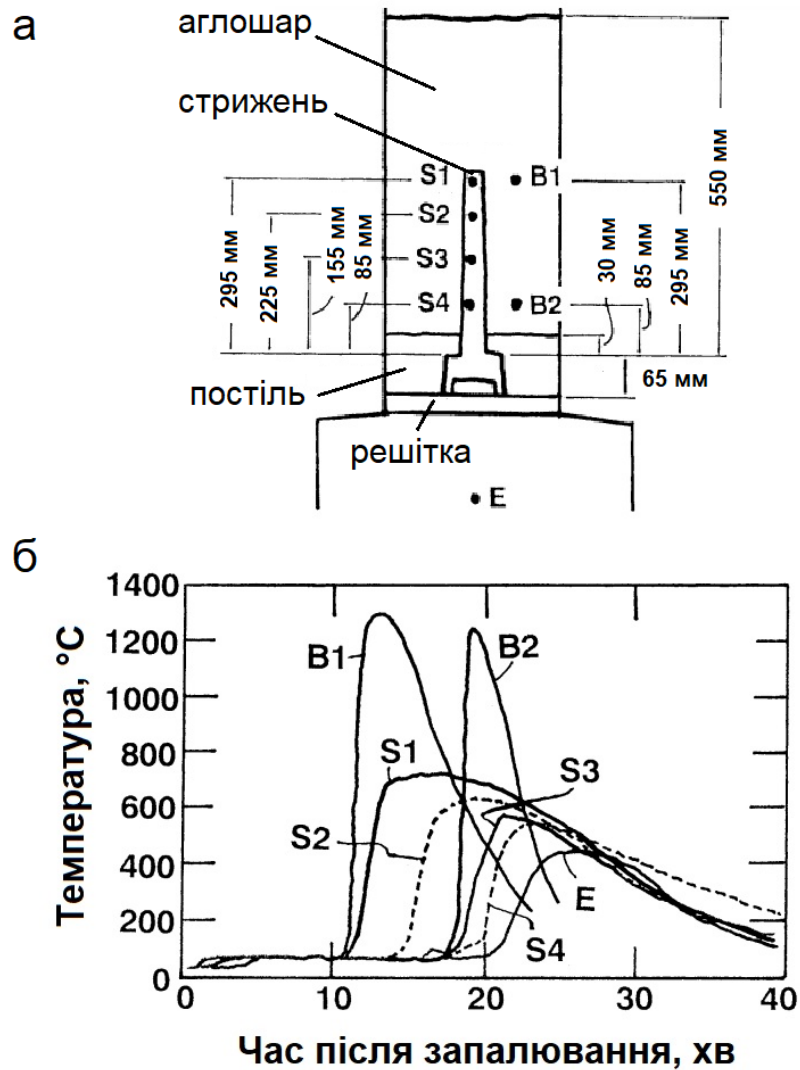


Рисунок 3.4 – Схема розташування точок вимірювання (а) та зміна температури стрижня, аглошару і газів, що відходять під час спікання (б):

S1–S4 – температура стрижня; B1–B2 – температура шару; E – температура газів, що відходять

Температура нижньої частини (S4) стрижня поступово зростала приблизно після 8 хв після того, як почала зростати температура верхньої частини (S1) стрижня. Після цього температура всього стрижня стала однаковою.

Отримані результати свідчать про те, що високі стрижні піддаються жорсткому тепловому режиму, при якому різниця температур в одному й тому

ж матеріалі складає приблизно 700 °С й зберігається впродовж 8 хв. При цьому таке коливання температур повторюється понад 20 разів на добу.

На рисунку 3.5 наведено порівняння розповсюдження тепла в низьких та високих стрижнях після запалення. Перепад температур у низькому стрижні також склав 700°С, коли температура верхньої його частини (S1) почала підвищуватись через 20,5 хв. після запалення. Через 23,4 хв. після запалення температура всього стрижня практично вирівнялась. Отриманий результат дозволяє зробити висновок, що термічна напруга низького стрижня менша, ніж високого.

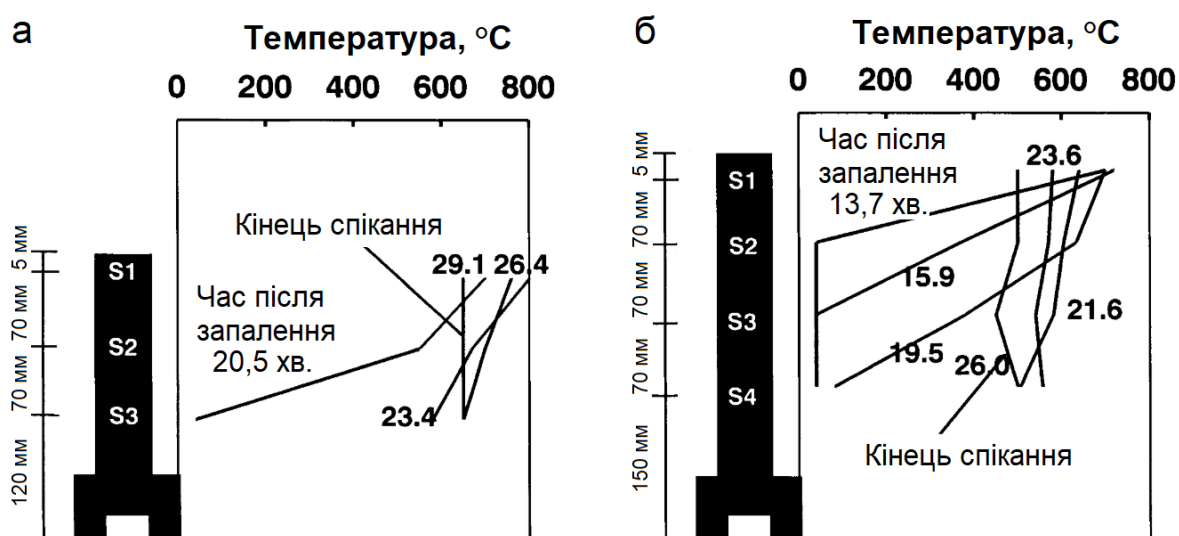


Рисунок 3.5 – Поширення тепла в низькому (а) й високому (б) стрижнях після запалення

Тому для виготовлення стрижнів необхідно використовувати матеріал, що має не лише міцність при високих температурах, але й стійкість до термічного удару. Стрижні, виготовлені з різних матеріалів, були прикріплені до спікальних візків промислової агломації для випробування на довговічність. Результати випробувань наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Матеріали, використані для виготовлення стрижнів

Матеріал	Модифікація	Середня довжина тріщини*, мм	Міцність при високій температурі**, МПа
----------	-------------	------------------------------	---

А	Ферит-перліт	0,0	20
Б	Ферит-перліт	0,02	50
В	Аустеніт	0,10	110
Г	Аустеніт	0,25	120
Д	Аустеніт-ферит	0,05	75

\* Після нагрівання до 900 °С і 100 теплозмін

\*\* Тривала міцність при 700 °С за 1000 год

За результатами випробування для виготовлення стрижнів був обраний матеріал Б, який має не лише досить велику міцність при високих температурах, але й стійкість до термічного удару.

Стосовно форми стрижнів, стрижні у вигляді пластин були обрані для забезпечення підтримки агломерату на промисловій агломашині, де кількість агломерату значно більша, ніж при випробуваннях в аглочаші. Окрім того, трапецієподібні стрижні були вибрані на основі результатів аналізу FEM (методу кінцевих елементів), який показав, що максимальне напруження верхньої частини стрижня під час спікання зменшувалось із зменшенням довжини верхньої частини стрижня.

Висота трапецієподібних стрижнів висотою 300 мм з матеріалу Б зменшилась всього на 50 мм без утворення значних тріщин після дворічного випробування на довговічність.

### 3.3 Результати дослідних спікань з використанням стрижнів

В таблиці 3.3 наведені результати дослідних спікань на агломашині Kimitsu №1 площею спікання 183 м<sup>2</sup>.

Таблиця 3.3 – Результати дослідних спікань зі стрижнями на агломашині Kimitsu №1

Показники	Базове спікання	Спікання з низькими стрижнями	Спікання з високими стрижнями



Продуктивність, т/доб·м <sup>2</sup>	40,0	41,2	41,6
Швидкість спікання, мм/хв	31,30	33,8	36,9
Вихід придатного агломерату, %	85,5	85,3	84,8
Вміст випаленого вапна, %	1,40	1,91	1,25
Міцність, %	88,5	88,2	88,3

Для визначення оптимальної висоти стрижнів на палети агломашини спочатку встановлювались низькі стрижні, а потім поступово замінювались високими. Швидкість спікання була більшою в обох випадках у порівнянні з базовим спіканням. При цьому вихід придатного агломерату і його міцність залишалися приблизно однаковими. В результаті продуктивність збільшилась при використанні як низьких, так і високих стрижнів. Найбільший приріст продуктивності агломашини спостерігався при встановленні на палети високих стрижнів.

Особливістю спікання з використанням стрижнів є те, що вихід придатного агломерату і його міцність не зменшувались, не зважаючи на збільшення швидкості спікання, як показано на рисунку 3.6. Ймовірно, що цей факт зумовлений гомогенним спіканням нижньої частини агломераційного шару. Результати дослідного спікання доводять перевагу високих стрижнів.

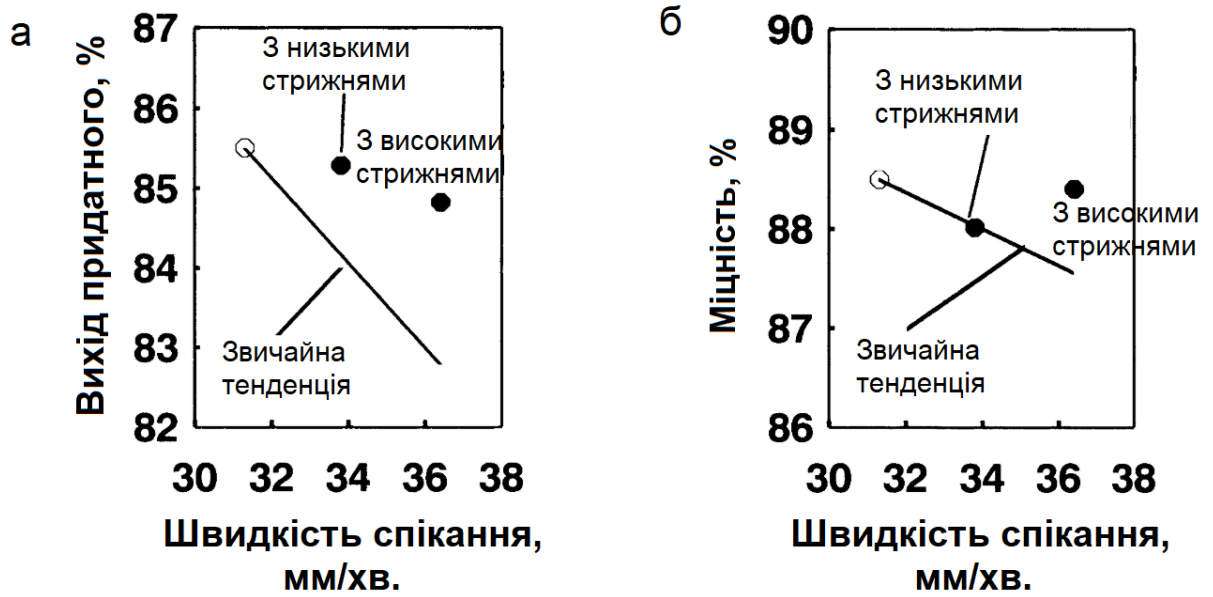


Рисунок 3.6 – Вихід придатного (а) та міцність агломерату (б) після встановлення стрижнів

З огляду на це були проведені дослідні спікання з високими стрижнями на агломераційній машині з більшою площею спікання.

На рисунку 3.7 наведено результати роботи агломераційної машини Kimitsu № 3 площею спікання 500 м<sup>2</sup> з встановленням на спікальних візках високих стрижнів.

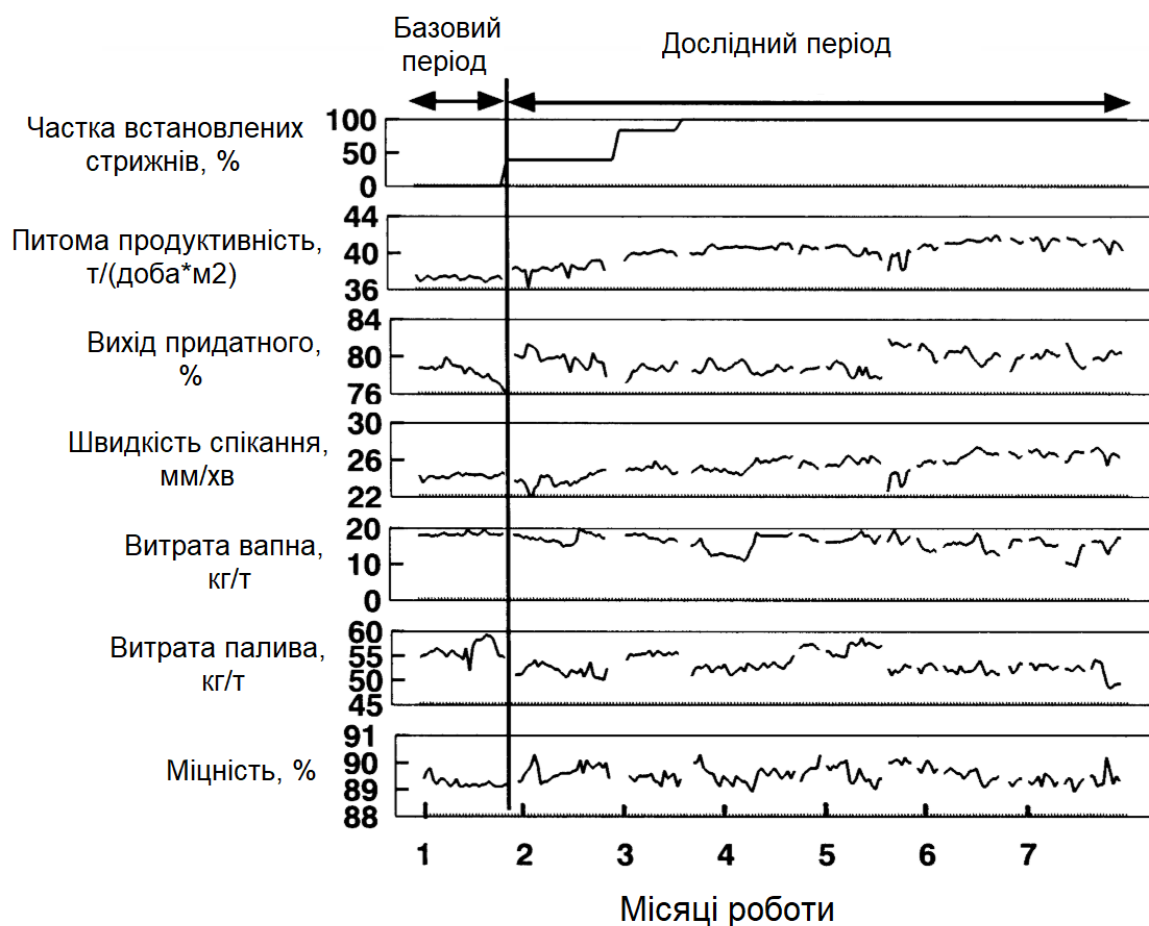


Рисунок 3.7 – Результати дослідного спікання на агломашині Kimitsu №3

В результаті використання високих стрижнів продуктивність агломашини збільшилась на 10%, а вихід придатного агломерату і його міцність практично не змінились.

На рисунку 3.8 продемонстровані результати вимірювання поширення тепла в шарі і навантаження на стрижень під час випробних спікань.

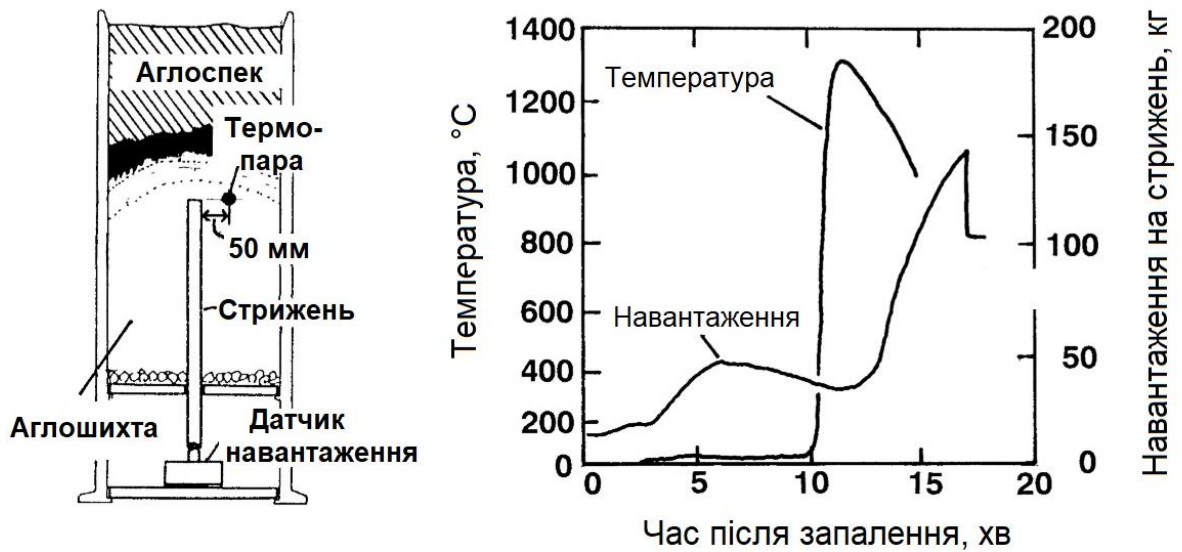


Рисунок 3.8 – Навантаження на стрижень при спіканні

Температура агломераційного шару в верхній частині стрижня вимірювалась термопарою, а навантаження, прикладене до стрижня, вимірювалось датчиком навантаження під стрижнем. Після запалення до стрижня прикладалось навантаження, що відповідає тиску всмоктування. Навантаження не змінювалось навіть при різкому збільшенні температури й досягненні фронтом зони горіння-плавлення верхівки стрижня. Далі навантаження починало зростати коли температура у верхній частині стрижня знизилась до 1200 °С. Навантаження на стрижень зростало по ходу спікання.

Це спостереження вказує на те, що стрижень починає підтримувати аглошар одразу після затвердіння розплаву в верхній частині стрижня і стрижень продовжує підтримувати аглошар до кінця спікання.

Продуктивність агломераційного процесу при роботі установки можна виразити наступним чином:

$$P=60 \cdot 24/1000 \cdot v_{сп} \cdot \rho \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (3.1)$$

де  $P$  – продуктивність, т/(доб.·м<sup>2</sup>);

$v_{сп}$  – швидкість спікання, мм/хв;

$\rho$  – щільність сирової агломераційної шихти, т/м<sup>3</sup>;

$\eta_1$  – вихід аглоспеку, %;

$\eta_2$  – вихід придатного, %.

Результати дослідного спікання наведені в таблиці 3.4. Аналіз чинників, що впливають на продуктивність агломераційного процесу, визначених в ході випробувань, проведених на агломашині Kimitsu №3, показали, що головною причиною підвищення продуктивності є збільшення швидкості спікання.

Таблиця 3.4 – Зміна продуктивності й інших показників спікання на агломераційній машині

Показники	Базове спікання	Спікання з високими стойками	Зміна, %
Продуктивність, т/доб·м <sup>2</sup>	37,3	40,8	9,4
Швидкість спікання, мм/хв	24,2	25,9	6,9
Щільність сирої шихти, т/м <sup>3</sup>	1,61	1,66	3,2
Вихід аглоспеку $\eta_1$ , %	88,3	88,0	-0,3
Вихід придатного $\eta_2$ , %	78,4	79,4	1,3

Окрім того, підвищенню продуктивності сприяють й інші чинники.

При встановленні стрижнів об'єм спікального візка зменшується на 0,9%. Проте щільність шихти збільшувалась ще до корекції об'єму візка, збільшення якого було пов'язане зі збільшенням висоти шару.

В традиційній технології спікання тиск всмоктування збільшувався за рахунок збільшення загального опору шару (зниженні газопроникності шару) при збільшенні його висоти. Однак, за рахунок використання стрижнів спостерігалось покращення газопроникності шихти, що спікається, що дозволило підвищити висоту шару. Крім того, вихід придатного збільшився за рахунок однорідності спікання нижньої частини агломераційного шару.

На рисунку 3.9 показано порівняння усадки й швидкості газового потоку на поверхні агломераційного шару у випадку використання низьких та високих стрижнів.

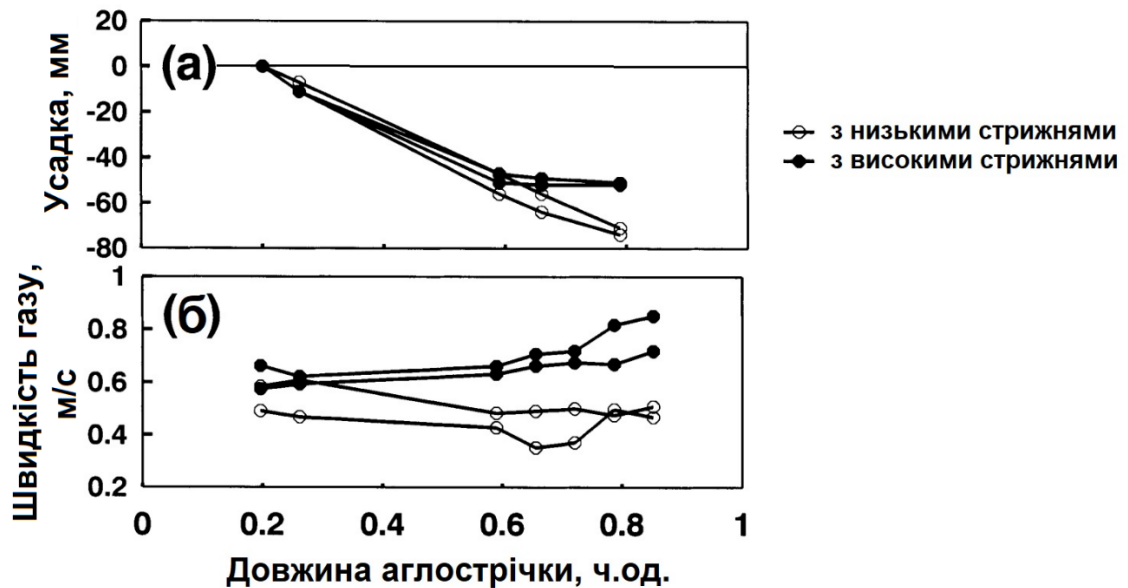


Рисунок 3.9 – Зміна усадки (а) й швидкості газу (б) по довжині аглострічки з використанням низьких та високих стрижнів

В ході спікання шар на палетах, на якій були встановлені низькі стрижні лінійно стискався. З іншого боку, на палетах з встановленими високими стрижнями не відбувалась усадка шару в другій половині аглострічки. І, хоча витрати газу в обох випадках в першій половині аглострічки були майже однаковими, в другій половині аглострічки витрата газу у випадку з високими стрижнями помітно збільшувалась.

Місце вздовж аглострічки, де припиналась усадка й збільшилась витрата газу, відповідало місцю, де верхня поверхня зони горіння-плавлення сягала вершини високих стрижнів. Тому можна вважати, що вага агломераційного спеку в цей момент починає підтримуватись стрижнем і спікання далі відбувається в умовах невеликого навантаження.

На рисунку 3.10 представлені результати вимірювання температури та вмісту кисню у газах, що відходять з-під палет, в процесі спікання.

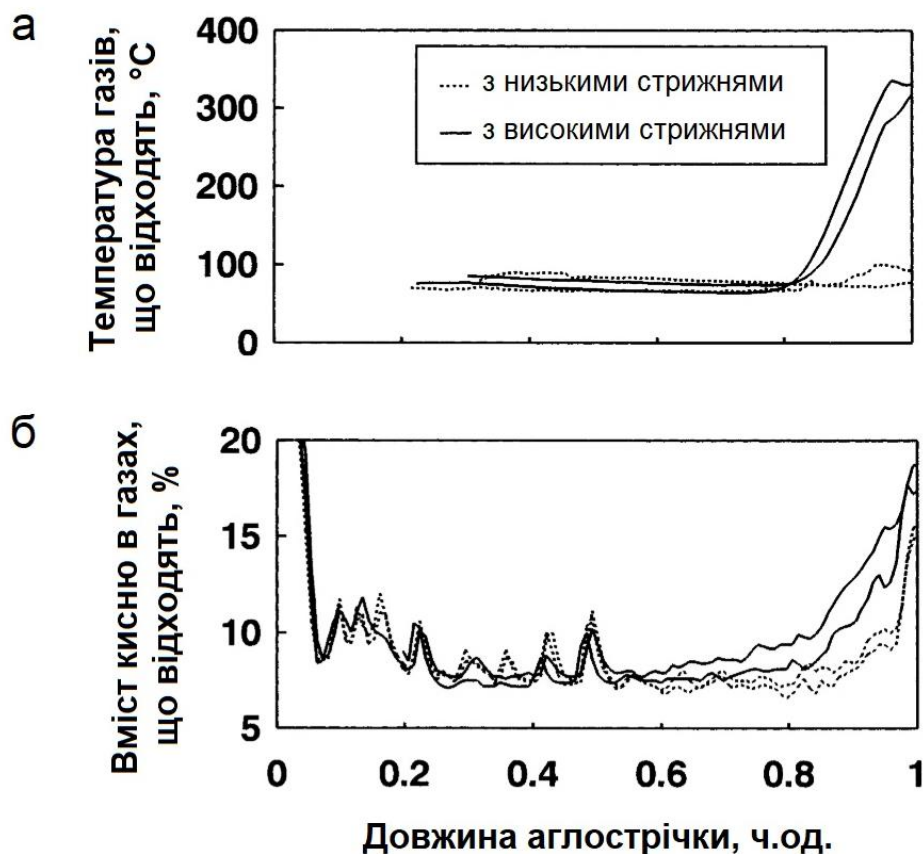


Рисунок 3.10 – Зміна температури (а) й вмісту кисню (б) в газах, що відходять на агломашині Kimitsu №1

Під час вимірювань швидкість руху аглострічки підтримувалась сталою. Момент підвищення температури й вмісту кисню в газах, що відходять, у випадку встановлення високих стрижнів настав раніше, ніж у випадку використання низьких стрижнів. Це свідчить про те, що процес спікання в першому випадку протікав швидше, ніж у другому.

На рисунку 3.11 демонструється співвідношення між висотою стрижня й ділянкою, коли спікання відбуватиметься при невеликому навантаженні.

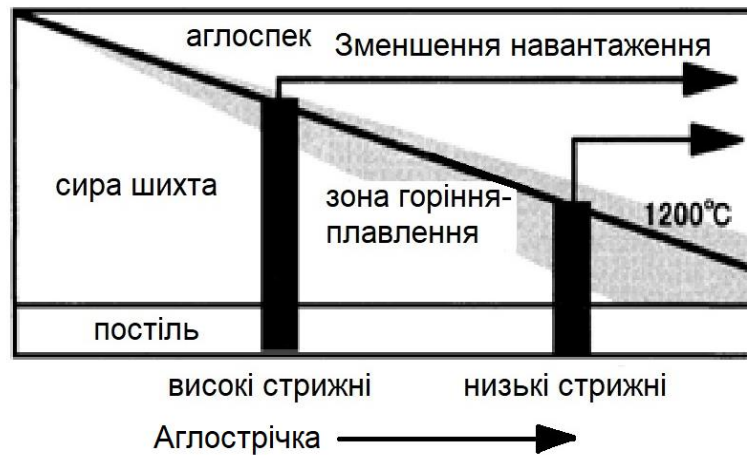


Рисунок 3.11 – Зміна ділянки аглошихти, що спікається під невеликим навантаженням, від висоти стрижнів

Оскільки верхня поверхня зони горіння-плавлення сягає верхівки високих стрижнів раніше, ніж низьких, кількість аглошихти, що буде спікатись при невеликому навантаженні, збільшується. З іншого боку, висота зони горіння-плавлення збільшується, коли низькі стрижні починають тримати навантаження аглоспеку, й кількість аглошихти, що могла б спікатися при невеликому навантаженні, зменшується. Тому високі стрижні мають значно більший ефект, ніж низькі. Однак занадто високі стрижні пробивають аглоспек [10].

### 3.4 Дослідження структури аглоспеку та якості агломерату

На рисунку 3.12 представлені КТ-зображення аглоспеку по ширині палети, отриманого у виробничих умовах. Верхні частини обох аглоспеків мають візуально однакову структуру й однакову пористість. Аглоспек, отриманий з використанням високих стрижнів, в нижній частині є більш пористим, ніж отриманий без стрижнів.

Також варто відзначити, що під час промислових випробувань навколо високого стрижня не спостерігалось збільшення неспеченої шихти, як це мало місце при спіканні в аглочасі [13]. Можна припустити, що це пов'язане з тією





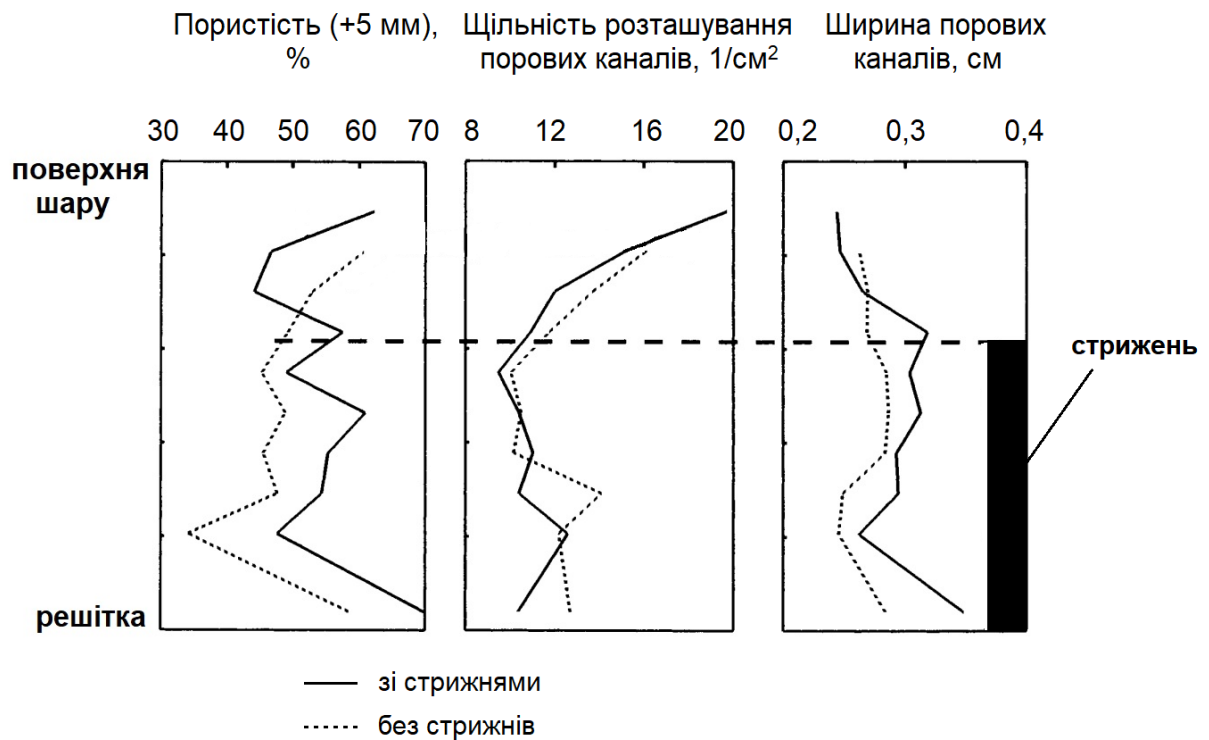


Рисунок 3.13 – Пориста структура аглоспеку, отриманого з використанням стрижнів та без них

В [14] показаний вплив навантаження на зміну структури шару в зоні конденсації вологи.

Виходячи з цього результату, вважається, що вплив навантаження на зміну структури шару в зоні горіння-плавлення буде значно більшим, ніж вказаний в [14] вплив на зміну структури шару в зоні конденсації, оскільки зона горіння-плавлення є більш рухливою, ніж зона конденсації, через наявність розплаву.

На рисунку 3.14 наводиться відновлюваність та пористість агломерату по висоті аглошару. Пористість вимірювали шляхом аналізу зображень. Відновлюваність (JIS-RI) покращилась в нижній частині спеку у випадку зі стрижнями.

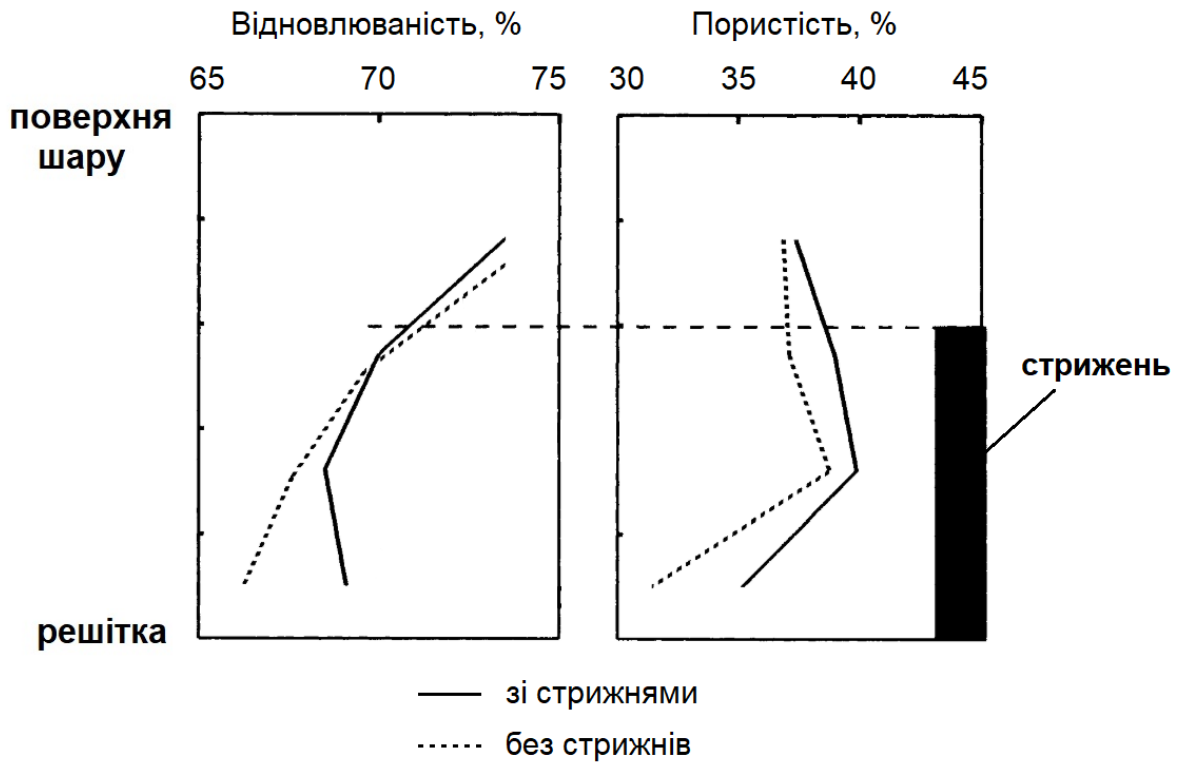


Рисунок 3.14 – Відновлюваність та пористість агломерату, отриманого зі стрижнями та без них

За допомогою мікроскопії було встановлено, що агломерати, отримані зі стрижнями, мають складну розгалужену систему порових каналів. Вважається, що це спричинене збільшенням пористості за рахунок підтримки аглоспеку стрижнем і скорочення часу спікання. Ці фактори є основними причинами покращення відновлюваності агломерату.

## ВИСНОВКИ

Дослідження процесу спікання аглошихти з використанням стрижнів, тобто підтримка аглоспеку, що формується, стрижнями у вигляді брусів або пластин, прикріплених до палет, дозволяє зробити наступні висновки:

1. Усадка агломераційного шару чинить значний вплив на газопроникність. Навантаження на зону горіння-плавлення є основним фактором усадки.

2. Майже рівномірна усадка може бути досягнута при правильному розташуванні стрижнів на палетах. Найкраще підходять трапецієподібні пластини, виготовлені з матеріалу, що має одночасно міцність при високих температурах та стійкість до теплового удару.

3. Підвищення продуктивності є вищим у випадку використання високих стрижнів (вище 250 мм), аніж низьких (нижче 250 мм). Вихід придатного та відновлюваність не знизилась, проте швидкість спікання зросла.

4. Пористість більше 5 мм в агломераті нижньої частини шару більша у випадку використання стрижнів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. R. Wild and K. G. Dixton: Agglomeration, ed. by W. A. Knepper, Interscience, New York, (1962), 565.
2. B. Ramberg and S. Eketorp: Jernkont. Ann., 148 (1964), 897.
3. M. Wajima, Y. Hosotani, J. Shibata, H. Sohma and K. Tashiro: Tetsuto-Hagané, 68 (1982), 1719.
4. K. Tashiro, H. Soma, J. Shibata, N. Kon-no and Y. Hosotani: Tetsuto-Hagané, 66 (1980), 1603
5. K. Nushiro, Y. Konishi, K. Igawa, K. Takihira and N. Fujii: Tetsu-toHagané, 83 (1997), 413.
6. J. Shibata, M. Wajima, H. Soma and H. Matsuoka: Tetsu-to-Hagané, 70 (1984), 178.
7. E. Kasai, W. J. Rankin, R. R. Lovel and Y. Omori: ISIJ Int., 29 (1989), 635.
8. T. Inazumi, M. Fujimoto, S. Sato and K. Sato: ISIJ Int., 35 (1995), 372.
9. S. Kasama, T. Inazumi and T. Nakayasu: ISIJ Int., 34 (1994), 562.
10. T. Nakayasu, M. Kobayashi, S. Amano, M. Nakayama, T. Nosaki, T. Terada, M. Fujimoto and T. Inazumi: CAMP-ISIJ, 5 (1992), 137.
11. S. Sato, T. Kawaguchi, M. Ichidate and M. Yoshinaga: Tetsu-toHagané, 73 (1987), 804.
12. M. J. Cumming and J. A. Thurlby: Ironmaking Steelmaking, 17 (1990), 245.
13. T. Inazumi, M. Fujimoto, S. Amano, S. Matsunaga and T. Nakayasu: CAMP-ISIJ, 7 (1994), 141.
14. K. Nushiro, N. Oyama, K. Igawa and K. Sorimachi: CAMP-ISIJ, 10 (1997), 940.