

УДК 669.162-669.181.4

*Форись С.М. – асистент, НМетАУ*

*Федоров С.С. – канд. техн. наук, доц., НМетАУ*

*Федоров О.Г. – канд. техн. наук, доц., НМетАУ*

## **РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ ШАХТНОЇ ВАПНЯНО-ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ ПЕЧІ НА ПРИРОДНОМУ ГАЗІ**

*На основі математичного моделювання досліджено вплив режимних параметрів на показники роботи протиточної шахтної вапняно-випалювальної печі, що працює на природному газі. В якості основних показників роботи печі розглянуті структура видаткових статей теплового балансу та ступінь випалу вапняку.*

### **Вступ**

Близько 30 % металургійного вапна виробляють у газових протиточних шахтних печах, питома витрата палива в яких становить 140 ÷ 150 кг у.п./т. Аналіз експлуатаційних показників даних агрегатів показує наявність значного потенціалу в економії палива та підвищенні якості готового продукту [1]. У цьому зв'язку, питання всебічного їхнього вивчення мають велике наукове й практичне значення.

### **Аналіз існуючої інформації**

Аналіз літературних джерел показав, що результати комплексних досліджень теплової роботи шахтних вапняно-випалювальних печей представлені малою кількістю робіт [2 – 4]. Основною причиною є складність теплофізичних процесів, що відбуваються у печах, вивчення яких вимагає проведення масштабних і витратних наукових експериментів.

### **Мета та завдання досліджень**

Метою даної роботи є дослідження впливу режимних параметрів шахтної вапняно-випалювальної печі на основні показників її роботи: структуру теплового балансу та ступінь випалу вапняку.

### **Характеристика об'єкта дослідження**

Об'єктом дослідження обрана піч № 2 цеху випалу вапняку ВАТ «Алчевський металургійний комбінат» (ВАТ «АМК») [1]. Основні її технічні характеристики представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

*Основні технічні характеристики шахтної  
вапняно-випалювальної печі № 2 ВАТ «АМК»*

Параметр	Од. вим.	Значення
Робоча висота печі	м	18
Діаметр шахти	м	4,3
Добова продуктивність по вапну	т/добу	200
Вид палива	-	Природний газ
Рівень розташування центрального пальника від стола вивантаження вапна	м	2
Рівень розташування нижнього ярусу бічних пальників від стола вивантаження вапна	м	6
Рівень розташування верхнього ярусу бічних пальників від стола вивантаження вапна	м	8
Діаметр оброблюваних фракцій вапняку	мм	40 ÷ 80

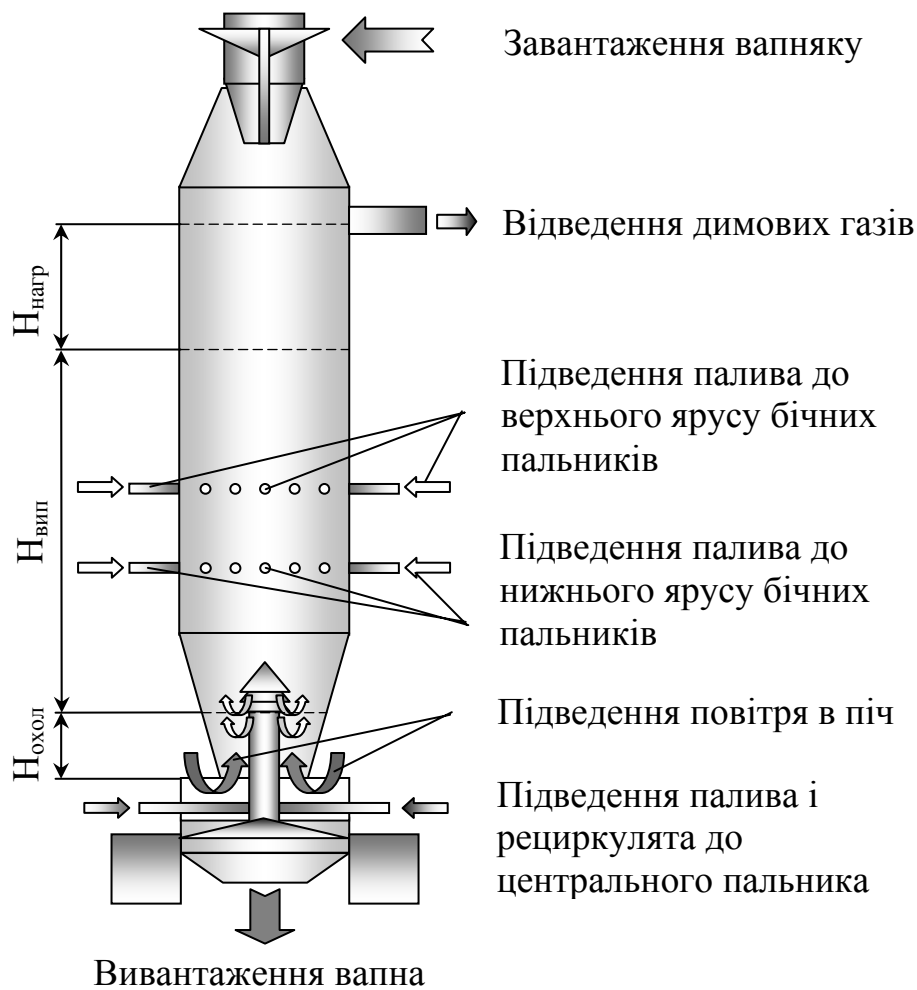
Схема дослідженої печі наведена на малюнку 1.

Піч являє собою вертикальну циліндричну шахту. Завантаження вапняку здійснюється зверху скіповим підйомником, вивантаження вапна – в основі печі. Рух матеріалу та газів в печі протиточний. Робочий простір печі складається із трьох технологічних зон: зони нагрівання вапняку, зони випалу та зони охолодження вапна, у якій нагрівається повітря. Подача палива відбувається через два яруси бічних пальників і центральний пальник (кern). Частина димових газів, що відходять із печі, направляється на рециркуляцію в центральний пальник.

### **Методика проведення досліджень**

Для дослідження впливу режимних параметрів на роботу печі була використана математична модель шахтної вапняно-випалювальної печі [5].

Математична модель являє собою сполучене чисельне рішення системи диференціальних рівнянь, що описують безвихровий рух газу в щільному шарі кускового матеріалу, конвективний і дифузійний перенос речовини в потоці, горіння палива, конвективний перенос теплоти в потоці, внутрішній тепло-масообмін у куску матеріалу.



Мал. 1 Схема шахтної вапняно-випалювальної печі на газподібному палеві:

$H_{\text{нагр}}$  - висота зони нагрівання вапняку;  
 $H_{\text{вип}}$  - висота зони випалу;  
 $H_{\text{охол}}$  - висота зони охолодження вапна

У моделі прибуткова частина теплового балансу включає теплоту, отриману в результаті згоряння палива і рециркулята, а також фізичну теплоту, внесену в піч із потоками маси речовини (паливом, повітрям, рециркулятом, вапняком).

Видаткові статті теплового балансу включають корисно використану теплоту, що пішла на дисоціацію вапняку  $q_{\text{кор}}$ , і втратами теплоти: з фізичною теплотою димових газів  $q_{\text{фіз}}^{\text{дим}}$ ; від неповного хімічного згоряння палива  $q_{\text{хім}}$ ; з фізичною теплотою готового продукту  $q_{\text{фіз}}^{\text{пр}}$ ; від зовнішнього охолодження корпусу печі  $q_{\text{охол}}$ .

При проведенні досліджень був вивчений вплив на роботу печі ряду режимних параметрів: витрати повітря, витрати рециркулята на

центральний пальник, витрати вапняку, середнього діаметра кусків матеріалу, розподілу палива між пальниками.

У якості базового був обраний один з режимів роботи печі, досліджений під час енергетичного обстеження діючого агрегату [1]. Досліджуваний діапазон зміни параметрів роботи печі відповідав її експлуатаційним показникам [1]. Характеристика базового режиму наведена в таблиці 2.

Таблиця 2

*Характеристика базового режиму роботи шахтної вапняно-випалювальної печі №2 ВАТ «АМК» [1]*

Параметр	Од. вим.	Значення
Витрата природного газу на піч	м <sup>3</sup> /год	1100
Витрата вапняку	т/доб	300
Середній діаметр кусків	мм	60
Витрата природного газу на центральний пальник	м <sup>3</sup> /год	700
Витрата природного газу на нижній ярус бічних пальників	м <sup>3</sup> /год	200
Витрата природного газу на верхній ярус бічних пальників	м <sup>3</sup> /год	200
Витрата рециркулята на центральний пальник	м <sup>3</sup> /год	1200
Витрата повітря на піч	м <sup>3</sup> /год	12000
Ступінь випалу вапняку: - за даними теплотехнічної лабораторії заводу [1] - за даними розрахунку [5]	%	86,0 74,7
Хімічна неповнота згоряння палива: - за даними енергетичного обстеження [1] - за даними розрахунку [5]	%	27,3 25,1

### **Аналіз результатів досліджень**

Результати досліджень впливу режимних параметрів представлені на малюнках 2 – 7.

#### Вплив перерозподілу палива між пальниками

Аналіз результатів досліджень показав: оптимальним з погляду повноти згоряння палива є розподіл природного газу між центральним і бічним пальниками в співвідношенні 37 % і 63 %, що в абсолютних одиницях становить 407 м<sup>3</sup>/год і 693 м<sup>3</sup>/год (малюнок 2). При цьому розподіл палива на верхній і нижній яруси бічних пальників рівномірний, а ступінь випалу вапняку складає 78 %. Наявність оптимуму обумовлена особливостями газодинамічної роботи печі. У цьому режимі забезпечується найкраще сумішоутворення палива й окислювача. При цьому, максимум втрат з фізичною теплотою газів, що йдуть, обумов-

лений зростанням температури на виході з печі в результаті більш повного згоряння палива. У той же час максимум корисної теплоти ( $q_{\text{кор}} = 43 \%$ ) відповідає розподілу палива між центральним і бічним пальниками в співвідношенні 40 % і 60 % (малюнок 2). При цьому ступінь випалу вапняку досягає 80 %.

Дослідження роботи печі при значенні витрати палива  $900 \text{ м}^3/\text{год}$  показав, що характер розподілу залежить від витрати природного газу на піч. У цьому випадку оптимальним є розподіл палива між центральним і бічним пальниками в співвідношенні 25 % і 75 % (малюнок 3). При цьому абсолютні значення витрат палива становлять відповідно  $225 \text{ м}^3/\text{год}$  і  $675 \text{ м}^3/\text{ч}$ . У свою чергу, максимальний ступінь випалу становить 70 %, що відповідає розподілу палива між центральним і бічним пальниками в співвідношенні 35 % і 65 %.

Слід також зазначити, що перерозподіл палива між нижнім і верхнім ярусами бічних пальників не приводить до істотної зміни структури теплового балансу печі.

#### Вплив витрати повітря на піч

Аналіз впливу витрати повітря на роботу печі показує наявність слабо вираженого оптимуму у видатковій статті теплового балансу - корисно використана теплота, що пішла на дисоціацію вапняку (малюнок 4). У діапазоні витрати повітря  $8000 \div 12000 \text{ м}^3/\text{год}$  поліпшується робота зони охолодження, що приводить до зниження втрат з фізичним теплом готового продукту. Цей зв'язок, а також поліпшення якості згоряння палива й приводять до росту корисної теплоти. Ступінь випалу при цьому досягає 74 %. При подальшому збільшенні витрати повітря від  $12000 \text{ м}^3/\text{год}$  до  $16000 \text{ м}^3/\text{год}$  втрати теплоти з димовими газами, починають переважати на тлі зниження втрат теплоти з хімічною неповнотою згоряння палива. У результаті корисна теплота й, відповідно, ступінь випалу вапняку різко знижуються.

#### Вплив витрати рециркулянта на центральний пальник

Зі збільшенням витрати рециркулянта на центральний пальник у діапазоні  $0 \div 1100 \text{ м}^3/\text{год}$  має місце виражене зниження втрат теплоти з хімічною неповнотою згоряння палива на 5 % і збільшення втрат теплоти з димовими газами на 4 % (малюнок 5). Це пояснюється тим, що рециркулянт містить у собі кисень (до  $6 \div 8 \%$ ) і виступає в ролі окислювача для частини природного газу, що надходить у центральний пальник. При подальшому зростанні витрати рециркулянта від  $1100 \text{ м}^3/\text{год}$  до  $2500 \text{ м}^3/\text{год}$  втрати теплоти з хімічною неповнотою згоряння палива знижується на 1 %, а втрати теплоти з димовими газами зростають на 3 %. Слід зазначити, що даний параметр не впливає

на втрати через ізоляцію печі й слабо впливає на корисне тепло і втрати з фізичним теплом готового продукту.

#### Вплив витрати вапняку

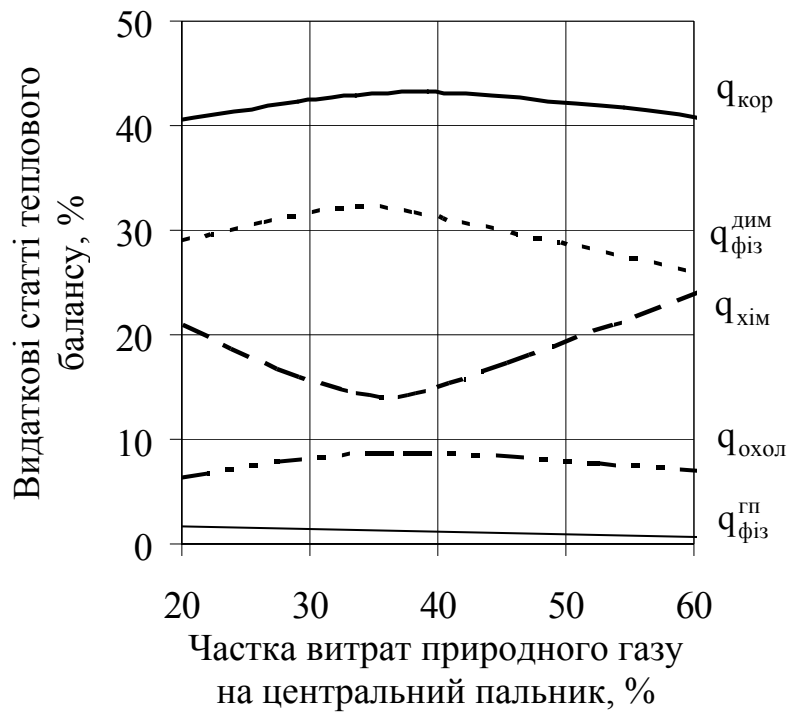
Зі збільшенням витрати вапняку в діапазоні 270 ÷ 330 т/доб можна відзначити незначне зменшення ступеня випалу з 76 % до 73 % (малюнок 6). Цей взаємозв'язок співпадає з експлуатаційними даними, згідно яким зміна темпів завантаження вапняку в зазначеному діапазоні й вивантаження вапна не робить істотного впливу на ступінь випалу. Втрати теплоти з димовими газами, при цьому, знижуються на 8 %. Крім того, необхідно відзначити деяку тенденцію до збільшення втрат теплоти з хімічною неповнотою згорання палива в межах 1 %. Як видно, це пов'язане зі збільшенням загального виходу діоксиду вуглецю  $\text{CO}_2$  у результаті розкладання вапняку і, як наслідок, з погіршенням умов дифузійного перемішування палива і окислювача в шарі кускового матеріалу, а також зсувом хімічних реакцій горіння палива у бік збільшення концентрації оксиду вуглецю  $\text{CO}$ .

#### Вплив середнього діаметра вапняку.

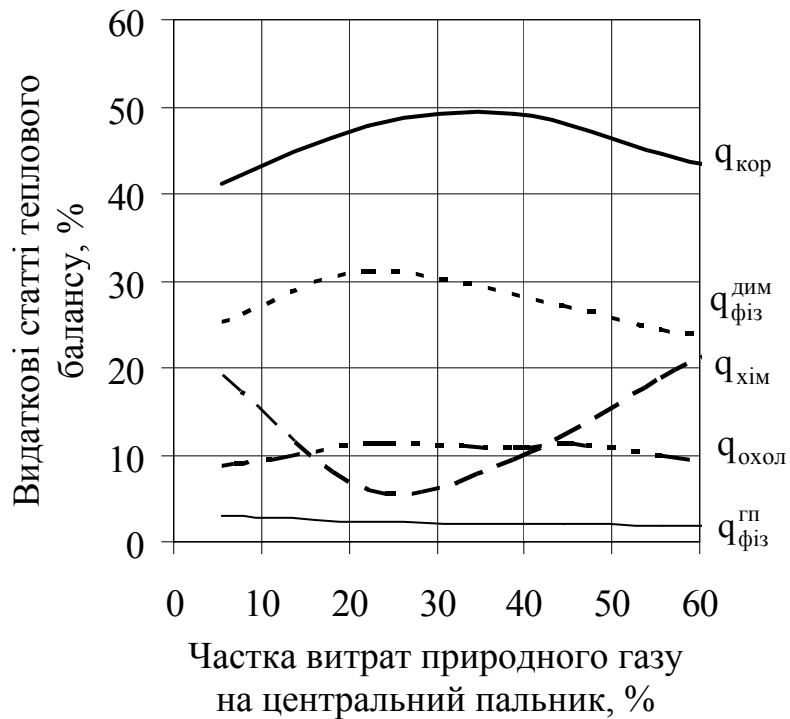
Слід зазначити значний вплив середнього діаметра фракцій вапняку на величину втрат теплоти з хімічною неповнотою згорання палива та корисно використану теплоту (малюнок 7). Зі збільшенням діаметра від 60 до 120 мм втрати теплоти з хімічною неповнотою згорання палива знижуються майже на 10 %. При цьому, корисне тепло зростає на 8 %, що відповідає зміні ступеня випалу від 75 до 88 %. Такий вплив обумовлений, у першу чергу, поліпшенням сумішоутворення палива й окислювача в шарі кускового матеріалу за рахунок більш інтенсивного дифузійного перемішування. Поряд із цим, втрати теплоти з димовими газами, втрати від зовнішнього охолодження й з фізичним теплом вапна практично не змінюються.

Таким чином, на основі виконаних розрахунково-теоретичних досліджень встановлено, що на роботу печі впливають всі без винятку режимні параметри: витрата повітря, витрата рециркулята на центральний пальник, витрата вапняку, середній діаметр кусків матеріалу, розподіл палива між пальниками. На втрати теплоти з хімічною неповнотою згорання палива основний вплив чинять середній діаметр кусків вапняку, витрата повітря, витрата рециркулята, розподіл палива між пальниками. На втрати теплоти з димовими газами – ті ж параметри та витрата вапняку.

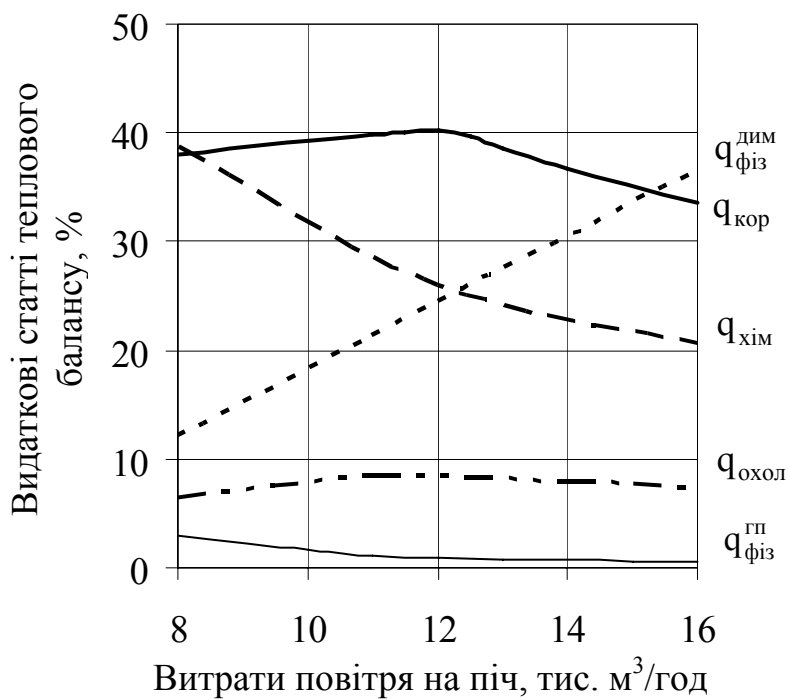
Необхідно відзначити також значний вплив на ступінь випалу середнього діаметра кусків вапняку, витрат палива на піч, витрат повітря, розподілу палива між пальниками.



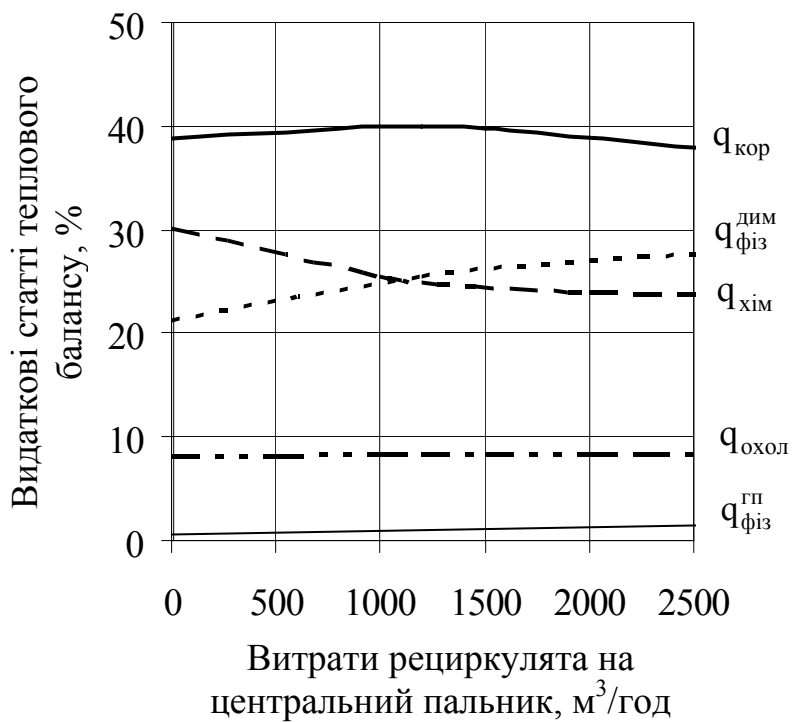
Мал. 2. Вплив перерозподілу палива між пальниками на видаткові статті теплового балансу печі. (Витрати палива на піч 1100 м<sup>3</sup>/год)



Мал. 3. Вплив перерозподілу палива між пальниками на видаткові статті теплового балансу печі. (Витрати палива на піч 900 м<sup>3</sup>/год)

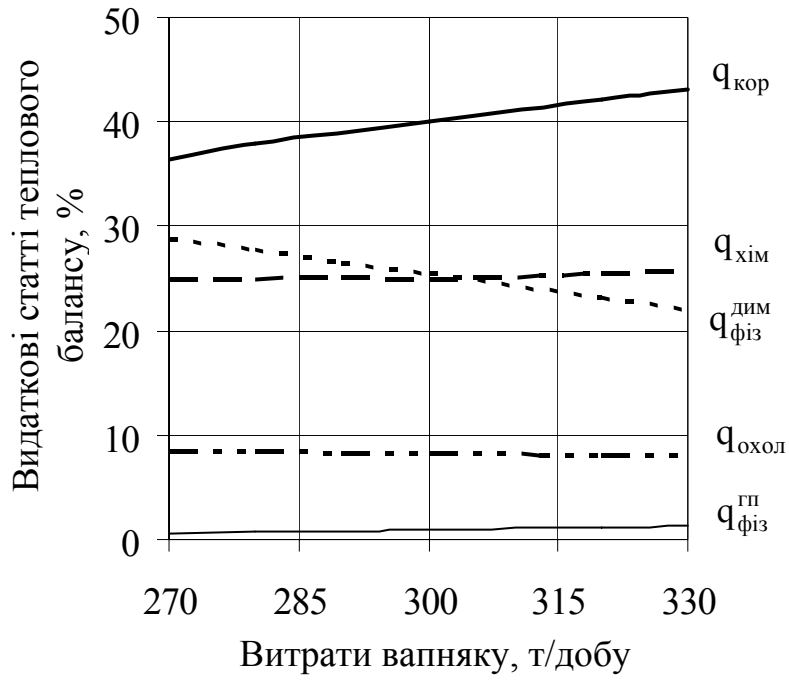


Мал. 4. Вплив витрати повітря на видаткові статті теплового балансу печі

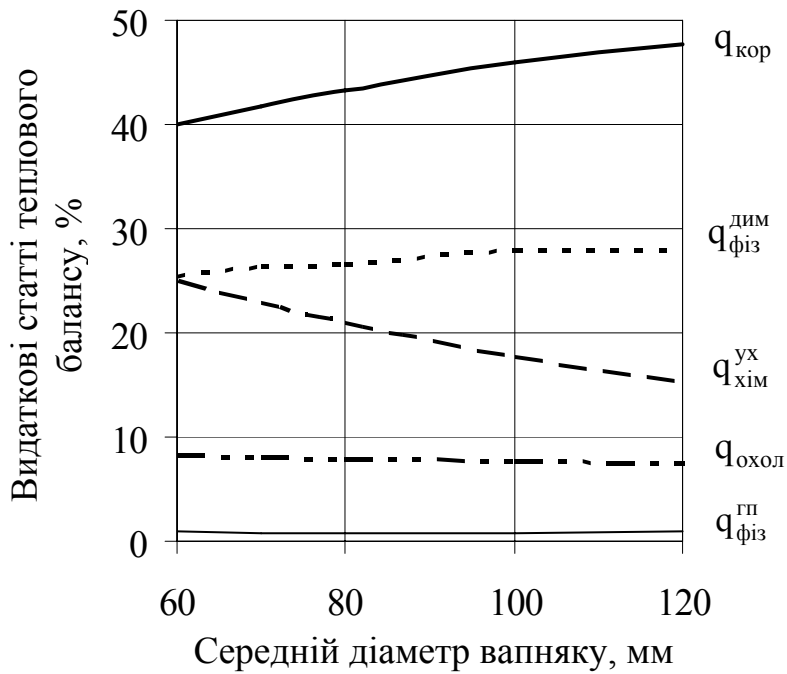


Мал. 5. Вплив витрати рециркулянта на видаткові статті теплового балансу печі





Мал. 6. Вплив витрати вапняку на видаткові статті теплового балансу печі



Мал. 7. Вплив середнього діаметру вапняку на видаткові статті теплового балансу печі

## Висновки

Досліджено вплив режимних параметрів на показники роботи шахтної вапняно-випалювальної печі: структуру видаткових статей теплового балансу й ступінь випалу вапняку. В якості режимних параметрів розглянуто: витрата повітря, витрата рециркулянта на центральний пальник, витрата природного газу на піч, витрата вапняку, середній діаметр кусків вапняку.

На основі розрахунково-теоретичних досліджень встановлено, що на роботу печі впливають всі перераховані параметри керування. При цьому основні зміни відбуваються у видаткових статтях теплового балансу: корисно використана теплота, що пішла на дисоціацію вапняку, втрати теплоти з хімічною неповнотою згоряння палива, втрати з фізичною теплотою газів, що йдуть.

Встановлені в ході досліджень зв'язки між режимними параметрами та показниками роботи будуть використані надалі для оптимізації режимів шахтних вапняно-випалювальних печей.

## Перелік посилань

1. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование и совершенствование технологии обжига известняка и тепловых режимов шахтных известково-обжиговых печей» / рук. проф., д.т.н. Губинский М.В. – № д. В-402-02-02-067/321. – Днепропетровск: НМетАУ, 2002. – 114 с.

2. Ляшенко Ю.П. Разработка и внедрение эффективных газодинамических и тепловых режимов шахтных печей для обжига известняка: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика» / Ляшенко Ю.П. – Днепропетровск, 1985. – 22 с.

3. Марутовская Н.Н. Тепловые процессы в шахтных обжиговых печах, методы расчета и возможности интенсификации: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химической технологии» / Марутовская Н.Н. – К., 1983. – 16 с.

4. Швыдкий Д.В. Разработка новой технологии получения металлургической извести в шахтных печах: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.16.02. «Металлургия черных металлов» / Швыдкий Д.В. – Екатеринбург, 1997. – 19 с.

5. Форись С.М. Математическое моделирование шахтных известково-обжиговых печей / С.М. Форись, С.С. Федоров, М.В. Губинский // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2008. – Т.2. – С. 98 – 104.

*Рукопись поступила 12.04.2008 г.*