

Форись С.Н., Губинский М.В., Федоров С.С., Федоров О.Г., Ковпак А.Г.

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ШАХТНЫХ ПРОТИВОТОЧНЫХ ИЗВЕСТКОВО-ОБЖИГОВЫХ ПЕЧЕЙ

Актуальность проблемы. Особенностью работы шахтных противоточных известково-обжиговых печей является неудовлетворительное перемешивание топлива и окислителя в слое кускового материала. Поэтому такие печи характеризуется значительным химическим недожогом топлива и неравномерным качеством обработки материала [1,2]. Фактический удельный расход топлива при этом превышает проектные показатели на 20÷30 %. Таким образом, вопросы повышения эффективности сжигания природного газа в данных агрегатах имеют большое практическое значение.

Цель. Целью данной работы явилась разработка оптимальных режимов эксплуатации шахтных известково-обжиговых печей, обеспечивающих снижение удельного расхода природного газа при заданных технологических параметрах: производительности и качестве готового продукта.

В качестве объекта исследования в работе выбрана шахтная противоточная известково-обжиговая печь с центральным и периферийным подводами топлива проектной суточной производительностью по извести 200 т/сут (рис.1) [4]. Печь отапливается природным газом, подвод воздуха осуществляется в основание печи. Конструкция центральной горелки предусматривает подачу топлива, рециркулята и некоторой части первичного воздуха.

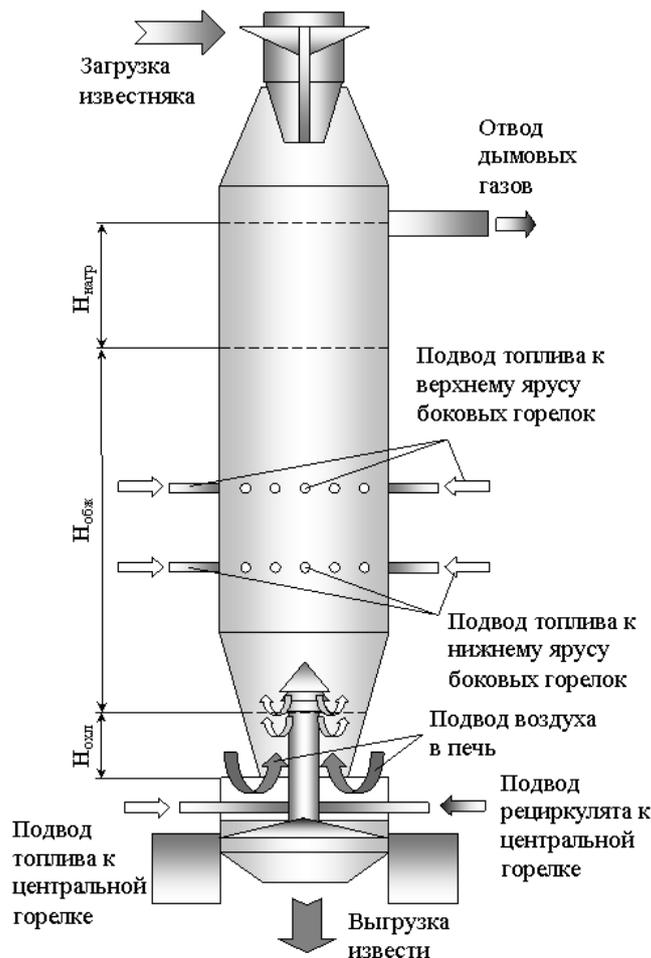


Рисунок 1 – Схема шахтной известково-обжиговой печи на газообразном топливе

$H_{нагр}$ – высота зоны нагрева известняка;

$H_{обж}$ – высота зоны обжига;

$H_{охл}$ – высота зоны охлаждения извести

Основой для проведения исследований явилась математическая модель работы печи [3], учитывающая газодинамику, конвективный и диффузионный перенос в газовой фазе, теплообмен в слое и куске материала, а также неполное горение топлива. С использованием модели выполнено параметрическое исследование влияния режимных параметров на показатели работы печи [5]. В соответствии с результатами расчетов [5] была получена регрессионная энергетическая характеристика печи, выражающая связь расхода топлива $V_{\text{пр}}$ с основными режимными параметрами работы печи (расходом топлива $V_{\text{пр}}^{\text{н}}$, воздуха $V_{\text{в}}^{\text{н}}$ и рециркулята $V_{\text{р}}$ на центральную горелку, расхода воздуха в основание печи $V_{\text{в}}$) и заданными технологическими показателями (суточной загрузки печи по известняку G и степени обжига материала σ):

$$\begin{aligned} V_{\text{пр}} &= f(V_{\text{пр}}^{\text{н}}, V_{\text{рец}}, V_{\text{в}}, V_{\text{в}}^{\text{н}}, G, \sigma) = \\ &= -4442 - 0,781 \cdot V_{\text{пр}}^{\text{н}} + 0,344 \cdot V_{\text{в}} + 13,1 \cdot G + 5095,54 \cdot \sigma - 0,06 \cdot V_{\text{в}}^{\text{н}} + \\ &+ 10^{-3} \cdot V_{\text{пр}}^{\text{н}^2} + 3 \cdot 10^{-5} \cdot V_{\text{рец}}^2 - 6,15 \cdot 10^{-4} \cdot G \cdot V_{\text{в}} + 5,752 \cdot G \cdot \sigma - \\ &- 1,44 \cdot 10^{-4} \cdot V_{\text{пр}}^{\text{н}} \cdot V_{\text{рец}} - 0,463 \cdot V_{\text{в}} \cdot \sigma + 1,94 \cdot 10^{-5} \cdot (V_{\text{в}} \cdot \sigma)^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Коэффициент детерминации R^2 уравнения (1) составил 0,95. Оценка значимости коэффициентов пропорциональности выполнялась с использованием критерия Стьюдента. Полученная энергетическая характеристика использована в качестве оптимизационной модели, а в качестве критерия оптимальности принят расход природного газа $V_{\text{пр}}$.

Кроме этого, согласно эксплуатационными и проектными показателями работы печи [4] в общую постановку задачи оптимизации расхода топлива был включен ряд ограничений:

- на диапазон изменения коэффициента расхода воздуха на печь $\alpha_{\text{п}}$:

$$0,8 \leq \alpha_{\text{п}} \leq 2; \quad (2)$$

- на соотношение расходов природного газа на центральную горелку и общего расхода на печь:

$$0,2 \leq \frac{V_{\text{пр}}^{\text{н}}}{V_{\text{пр}}} \leq 0,8; \quad (3)$$

- на диапазон изменения расхода рециркулята на центральную горелку:

$$0 \leq V_{\text{р}} \leq 2500, \text{ м}^3/\text{ч}; \quad (4)$$

- на диапазон изменения коэффициента расхода воздуха на центральную горелку $\alpha_{\text{п}}$:

$$0 \leq \alpha_{\text{п}} \leq 0,25. \quad (5)$$

Решение задачи (1)–(5) выполнено методом Ньютона. Полученные результаты представлены в табл. 1 и на рис. 2–3.

Из приведенных данных следует, что для печи данной конструкции в первую очередь необходима организация оптимального режима работы центральной горелки. В исследованном диапазоне $G = 270 \div 370$ т/сут и $\sigma = 75 \div 90$ % рекомендуемые расходы газов в центральную горелку составляют: $V_{\text{пр}}^{\text{н}} = 410 \div 430$ м³/ч; $V_{\text{рец}} = 730 \div 780$ м³/ч; $V_{\text{в}}^{\text{н}} = 980 \div 1040$ м³/ч (рис. 2–3). В дальнейшем, для обеспечения требуемого качества извести σ в зависимости от загрузки печи G следует управлять расходами топлива на периферийные горелки $V_{\text{пр}}^{\text{б}}$ и воздуха в основание печи $V_{\text{в}}$.

Как видно из рис. 2, с ростом производительности печи при заданном качестве извести расходы топлива и воздуха на печь увеличиваются. В то же время при увеличении степени обжига, напротив необходимо снижать подачу воздуха в основание печи при повышении расхода топлива. Последняя взаимосвязь поясняется тем, что снижение скорости спутного потока воздуха приводит к раскрытию диффузионного факела в слое кускового материала и соответственно способствует расширению зоны обжига по сечению печи.

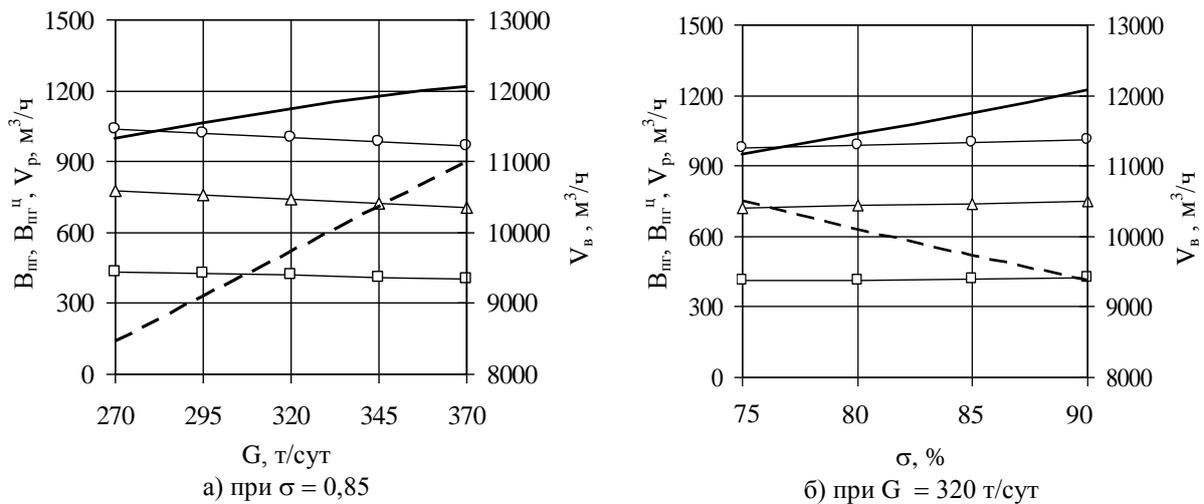


Рисунок 2 – Зависимость оптимальных режимных параметров работы печи от загрузки по известняку и степени обжига готового продукта

- расход природного газа на печь V_{pg}
- расход воздуха в основание печи V_v
- расход природного газа на центральную горелку V_{pg}^{II}
- △— расход рециркулянта на центральную горелку V_p
- расход воздуха на центральную горелку V_v^{II}

На рис. 3 показано изменение удельного расхода условного топлива на тонну активной извести в оптимальных режимах работы печи. Согласно представленным данным, удельный расход топлива на тонну активной извести тем меньше, чем выше производительность печи и ниже требования к качеству готового продукта.

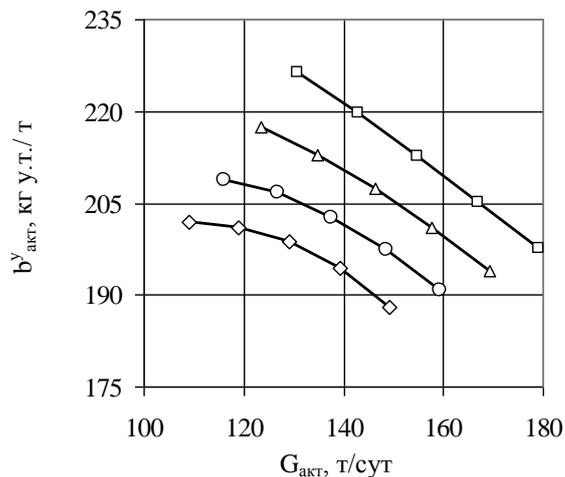


Рисунок 3 – Зависимость удельного расхода условного топлива от производительности печи по активной извести в оптимальных режимах работы

- $\sigma = 90 \%$
- △— $\sigma = 85 \%$
- $\sigma = 80 \%$
- ◇— $\sigma = 75 \%$

Таблица 1 – Сравнительная характеристика основных показателей работы печи

Параметр	Режим работы печи	
	Базовый	Оптимальный
Общий расход топлива $V_{пг}$, м ³ /ч	1100	1100
Расход топлива на центральную горелку $V_{пг}^{ц}$, м ³ /ч	700	420
Расход воздуха на центральную горелку $V_{в}^{ц}$, м ³ /ч	0	1000
Расход рециркулята на центральную горелку $V_{р}^{ц}$, м ³ /ч	1250	750
Расход воздуха в основание печи $V_{в}$, м ³ /ч	12000	9500
Загрузка печи по известняку G , т/сут	300	314
Степень обжига известняка σ , %	74,3	85,0
Общее содержание оксидов $(CaO+MgO)_{изв}^{общ}$ в извести, %	78,8	84,5
Выход извести $G_{изв}$, т/сут	205	200
Выход активной извести $G_{изв}^{акт}$, т/сут	120	144
Удельный расход топлива на тонну активной извести $b_{у}^{акт}$, кг ут/т	248	207

На основании решения задачи оптимизации для внедрения предложен энергоэффективный режим работы печи при $G = 314$ т/сут $\sigma = 85$ %, отвечающий проектным показателям по производительности и качеству (табл. 1). Сравнительный анализ фактического режима эксплуатации [6] и рекомендованного (табл. 1) показывает, что в новом режиме удельный расход топлива на тонну активной извести снижается на 17 %.

Выводы

1. На основе результатов параметрического исследования работы шахтной противоточной известково-обжиговой печи, решена задача оптимизации ее режимных параметров (распределения топлива, воздуха и рециркулята между центральной и периферийными горелками), обеспечивающая минимальные затраты природного газа при производстве извести.

2. Предложен энергоэффективный режим работы шахтной печи, обеспечивающий снижение удельного расхода природного газа на 17 % при заданных значениях качества готового продукта и производительности агрегата. Показано, что на всех режимах работы целесообразна настройка режима центральной горелки: расход топлива 410÷430 м³/ч; расход рециркулята 730÷780 м³/ч; расход воздуха 980÷1040 м³/ч. При этом, управление качеством извести в зависимости от производительности осуществляется изменением расхода топлива на периферийные горелки и расхода воздуха в основание печи.

Литература

1. Мадисон В.В., Рязанов В.Т., Гордон Я.М. Проблемы и пути повышения эффективности сжигания топлива в шахтных известковоробжиговых печах // *Металлургическая теплотехника*. – Днепрпетровск: НМетАУ. – 2002. – Т.6. – С. 89–99.
2. Лисиенко В.Г., Щелков Я.М., Ладыгичев М.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: Справочное издание: В 3-х книгах. Книга 2/ Под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2004. – 832 с.
3. Форись С.М., Федоров С.С., Губинский М.В.. Математическое моделирование шахтных известково-обжиговых печей // *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. – 2008. – Т.2. – С. 98–104.

4. Монастырев А.В. Производство извести. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. – 192 с.

5. Форись С.М., Федоров С.С., Федоров О.Г. Результати досліджень теплової роботи шахтної вапняно-випалювальної печі на природному газі //Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України. – Дніпропетровськ: «Нова ідеологія», 2008. – С. 297–306.

6. Форись С.Н., Федоров С.С., Федоров О.Г. Разработка и реализация рациональных режимов работы шахтных известково-обжиговых печей// Металургійна теплотехніка. Збірник наукових праць Національної металургійної академії України. – Дніпропетровськ: «ПП Грек О.С.», 2007. – С. 278–287.

УДК 66.041.44: 502.172 (043)

Форись С.М., Губинський М.В., Федоров С.С., Федоров О.Г., Ковпак Г.Г.

РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ШАХТНИХ ПРОТИТОЧНИХ ВАПНЯНО-ВИПАЛЮВАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

Вирішено задачу оптимізації режимів роботи шахтної протиточної вапняно-випалювальної печі з метою скорочення витрати природного газу. В якості керуємих режимних параметрів розглянуто витрати палива, повітря та рециркуляту. В якості незалежних технологічних параметрів – завантаження печі вапняком та ступінь випалу матеріалу. Очікуване зменшення питомої витрати палива складає 17 %.

Foris S., Gubinsky M., Fedorov S., Fedorov O., Kovpak A.

THE EFFECTIVE WORKING CONDITIONS DEVELOPMENT OF SHAFT COUNTER-FLOW LIME-KILNING FURNACE

For reduction of natural gas consumption the working conditions optimization problem of shaft counter-flow lime-kilning furnace is solved. The fuel, air and recycling gas consumptions were examined as controllable working conditions. The furnace-charge with limestone and material burning degree – as independent manufacturing parameters. The expected fuel rate economy made up 17 %.