

УДК 66.041.491

В.Ю. Щербина

## ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СЛАНЦЕВОГО ГАЗУ В ОБЕРТОВИХ ПЕЧАХ ПРОМИСЛОВОСТІ БУДМАТЕРІАЛІВ

The possibility of shale gas usage in existing kilns of building materials industry is analyzed. The questions considering determination of thermal performance conditions of kilns for burning cement using nature and shale are studied. For a more complete modeling a mathematical model, compared with the known, taking into account such additional factors as the temperature of the exhaust gases and the conditions refractory lining wear during operation was applied. Conclusions are drawn about the possibility of structural elements furnace using shale gas: 1) significantly increases the amount of fuel requiring the installation of two or even three burners in the furnace unit; 2) low gas flow in the furnace is increased to ~ 300 °C requiring the selection of an appropriate type of refractory; 3) the temperature of the furnace body is increased to 35 °C–45 °C; 4) using the shale gas reduces the amount of secondary air, so it does not display significant impact on reducing fuel consumption. Hence there is the need for re-adjustment of the refrigerator, fans and ductwork used in the flowsheet. Thus, the direct application of shale requires replacement devices or nodes in the design of machines. Another option is to create a combined gas with a defined chemical composition by mixing oil shale and natural gas.

**Keywords:** shale gas, rotary kiln, temperature, the flow gases, heat transfer, mathematical model.

### Вступ

Промисловість будівельних матеріалів є одним із найбільших споживачів палива та займає за показником енергоємності 3-4 місце в економіці країни [1].

У цій промисловості широко застосовуються обертові печі, які використовуються як основні пристрої в процесі обробки сировинного матеріалу. Але особливе місце вони займають при виробництві цементу, де в них відбуваються основні витрати палива, які зазвичай визначають потужність цементного заводу. Актуальність питання полягає в тому, що в Україні тільки на виробництво цементу щорічно витрачається 1,5–2 млн т умовного палива (причому в особливо енергоємних печах “мокрого” способу, які становлять 85–90 % від усього парку обертових печей у цій галузі).

Тому становить інтерес вивчення питання про можливість використання сланцевого газу для цієї галузі промисловості [2, 3].

Природа формування природного і сланцевого газів різна, тому їх хімічний склад різниться. Зазвичай природний газ має до 98 % метану та є досить однорідним за своїм складом. Сланцевий газ, через низьку проникність порід, має неоднорідну насичуваність газами. Тому такий газ у кожному із родовищ, і навіть у конкретному місці родовища, зазвичай має свої властивості [2, 4] та інший хімічний склад.

### Постановка задачі

У роботі ставиться задача визначити умови теплової роботи обертових печей для обпалу

цементу та порівняти можливості їх застосування при використанні природного та сланцевого газів.

### Математична модель

Нині для теплових розрахунків обертових печей широко використовується зональний метод [6, 7]. Однак при його застосуванні такий важливий параметр, як температура газів, що відходять, вводиться в умови розрахунку як визначений і незмінний. При визначенні теплового балансу пічної установки цей фактор істотно впливає на питому витрату тепла, а він своєю чергою визначається витратою палива. Крім того, характерною особливістю обертових печей для обпалу в'яжучих і особливо цементу є зношування вогнетривкої футерівки в процесі роботи. Це зношування викликане активною дією на вогнетрив абразивних високотемпературних матеріалів, що обпалюються в печі. Тому вказаний фактор також повинен враховуватись при розрахунках.

У запропонованій математичній моделі розрахунковим методом визначається температура газів, що відходять з печі, враховується товщина футерівки і визначається витрата палива. Цього можна досягти при вирішенні системи нелінійних рівнянь, отриманих на підставі законів теплообміну в робочому просторі обертової печі.

Виходячи із зонального методу розрахунку втрати тепла з газами, що відходять, визначаються залежністю

$$Q_3 = [(V_{CO_2}^\Gamma + V_{CO_2}^M) \cdot C_{CO_2}(t) + (V_{H_2O}^\Gamma + V_{H_2O}^M + V_{N_2}^\Gamma \cdot C_{N_2}(t) + V_{O_2}^\Gamma \cdot C_{O_2}(t)) \cdot C_{H_2O}(t)] \cdot T_{\text{відх}}^\Gamma,$$

де  $V_{CO_2}^\Gamma, V_{CO_2}^M, V_{H_2O}^\Gamma, V_{H_2O}^M, V_{N_2}^\Gamma, V_{O_2}^\Gamma$  – об'єми складових газового потоку  $CO_2, H_2O, N_2, O_2$ , отримані в результаті горіння палива й розкладання матеріалу,  $\text{нм}^3/(\text{кг} \cdot \text{кл})$ ;  $C_{CO_2}(t), C_{H_2O}(t), C_{N_2}(t), C_{O_2}(t)$  – теплоємності  $CO_2, H_2O, N_2, O_2$ , що залежать від температури,  $\text{кДж}/\text{нм}^3$ ;  $T_{\text{відх}}^\Gamma$  – температура газів, що відходять,  $^\circ\text{C}$ .

Втрати тепла в навколишнє середовище через корпус визначаємо з умови збереження енергії й умов теорії теплопровідності відповідно:

$$Q_7 = Q - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6),$$

$$Q_7 = \sum_{i=1}^M P_i = \left( \frac{2\pi r}{\text{Пр}} \right) \sum_{i=1}^M \left[ (T_{k1i} - T_{k2i}) \frac{L_i}{R_i} \right].$$

де  $Q$  – статті приходу тепла,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{кл})$ ;  $Q_1$  – тепловий ефект клінкероутворення,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{кл})$ ;  $Q_2$  – втрати тепла на випар води,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{кл})$ ;  $Q_3$  – втрати тепла з газами, що відходять,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{кл})$ ;  $Q_4$  – втрати тепла із клінкером,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{кл})$ ;  $Q_5$  – втрати тепла з повітрям, що відходить із холодильника,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{кл})$ ;  $Q_6$  – втрати тепла з віднесенням,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{кл})$ ;  $R_i = \frac{\delta_{1i}}{\lambda_{1i}} + \frac{\delta_{2i}}{\lambda_{2i}}$  – тепловий опір корпусу,  $P_i$  – теплові втрати в навколишнє середовище відповідно до поточної зони,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{кл})$ ;  $r$  – радіус печі, м;  $\text{Пр}$  – продуктивність печі, кг;  $T_{k1i}, T_{k2i}$  – температури “гарячої” поверхні футерівки й “холодної” поверхні корпусу відповідно,  $^\circ\text{C}$ ;  $L_i$  – довжина зони, м;  $\delta_{1i}, \lambda_{1i}, \delta_{2i}, \lambda_{2i}$  – середня товщина (м) та коефіцієнт теплопровідності ( $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ ) футерівки й корпусу розглянутої зони печі;  $i = 1-8$  – кількість теплових зон у печі.

Значення приходу та витрат тепла визначаються відповідно до [6].

Загальна поверхня теплообміну й коефіцієнт тепловикористання визначаються з підсистеми

$$\begin{cases} F_n = \left( \frac{\eta}{0,124} \right)^3 \cdot \frac{Q \cdot S}{\sigma \cdot T_{\text{теор}}^4}, \\ \eta = 0,43 \cdot \left( \frac{F_n}{D_n^2} \right)^{0,1} + \sqrt{\frac{Q \cdot S}{\sigma \cdot T_{\text{теор}}^4 \cdot F_n} \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot T_{\text{теор}}^3}{\omega_\Gamma^{0,6}}}}, \end{cases}$$

де  $Q$  – теплота згорання палива,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ ;  $S$  – витрата палива,  $\text{нм}^3/\text{ч}$ ;  $T_{\text{теор}}$  – теоретична температура горіння полум'я,  $^\circ\text{C}$ ;  $D_n$  – внутрішній діаметр робочого простору печі, м;  $\sigma$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;  $\omega_\Gamma$  – швидкість руху газового потоку, м/с.

Витрата палива визначається з виразу

$$S = \text{Пр} \cdot \sum_{i=1}^L (G_i + P_i) / Q / \eta,$$

де  $G_i$  – витрата енергії на нагрівання й перетворення в матеріалі відносно зони,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{кл})$ .

Температури поверхні футерівки й корпусу визначаються з підсистеми

$$\begin{cases} T_{K1i} = T_{K2i} \cdot [1 + R_{Li} \cdot (3,5 + 0,062 \cdot T_{K2i})], \\ T_{K2i} = \frac{K_1 \cdot (T_i^\Gamma - T_{K1i}) + C_B \cdot \left[ \left( \frac{T_i^\Gamma + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{K1i} + 273}{100} \right)^4 \right]}{3,5 + 0,062 \cdot T_{K2i}}, \end{cases}$$

де  $T_i^\Gamma = 0,5(T_i^{\Gamma 1} + T_i^{\Gamma 2})$  – температура газового потоку на границях зон,  $^\circ\text{C}$ ;  $K_1 = 0,418 \lambda_\Gamma \times (\omega_\Gamma D_n / v_\Gamma)^{0,67} / D_n$  урахує вплив руху газового потоку;  $\lambda_\Gamma, v_\Gamma$  – теплопровідність і середня кінематична в'язкість продуктів згорання відносно зони,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град}), \text{ м}^2/\text{з}$ ;  $C_B = \frac{\sigma \varepsilon_M}{[1 - (1 - \varepsilon_M)(1 - F_{MT})]}$  – урахування чорності матеріалу при променистому теплообміні;  $\varepsilon_M$  – ступінь чорності матеріалу;  $F_{MT}$  – ступінь заповнення печі матеріалом.

Таким чином, отримано 46 нелінійних рівнянь (з урахуванням 9 рівнянь з визначення температури на границях зон  $T_i^\Gamma$ ), що містять 46 невідомих  $Q_3, S, Q_7, T_{\text{відх}}^\Gamma, F_n, \eta, T_{K1i}, T_{K2i}, R_i, T_i^\Gamma, P_i$ , тому система є замкнутою.

Для вирішення завдання використовувалася розроблена на кафедрі ХПСМ НТУУ “КПІ” інтегрована програмна система, призначена для моделювання теплового режиму в обертових печах.

### Аналіз отриманих результатів

У розрахунках для порівняння використовувався природний газ Дашавського родовища.

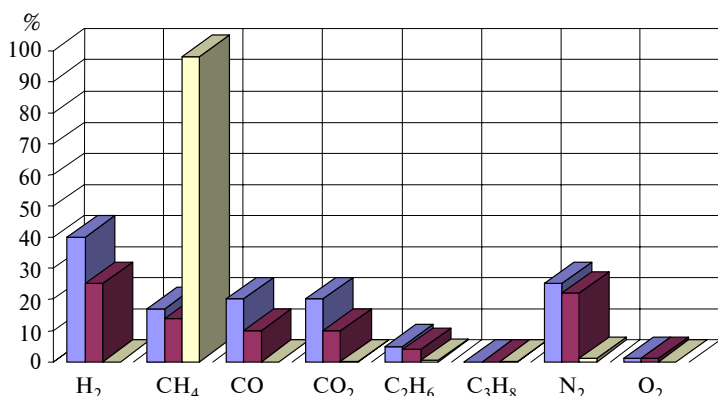


Рис. 1. Хімічний склад газів: ■ – сланцевий газ (максимальна); ■ – сланцевий газ мінімальна; ■ – газ Дашавського родовища

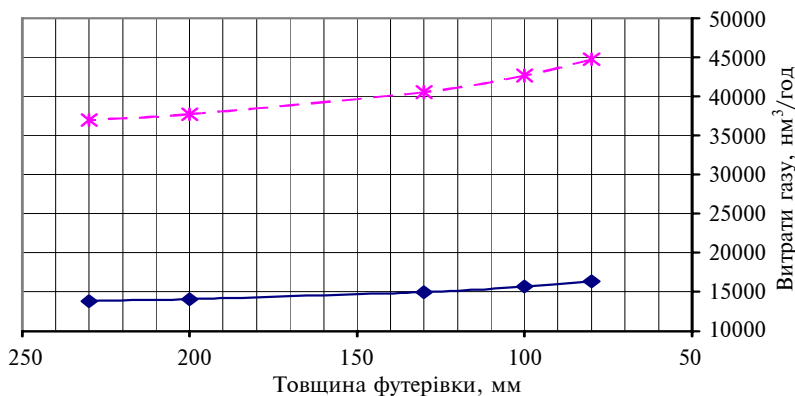


Рис. 2. Витрати газу: ◆ – дашавський газ; \* – сланцевий газ

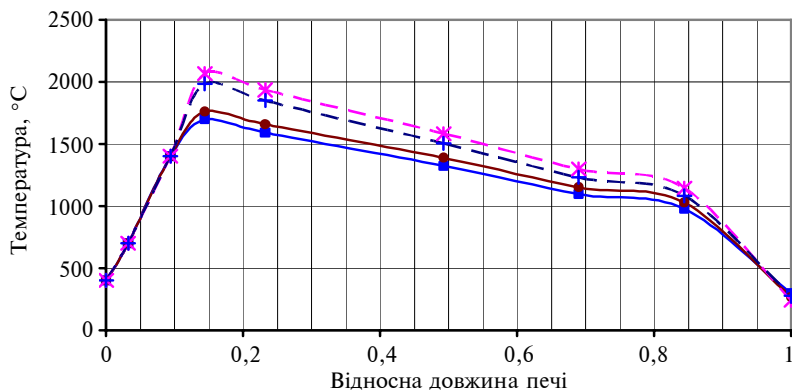


Рис. 3. Температура газового потоку: —■— дашавський газ, футерівка 080 мм; —●— дашавський газ, футерівка 230 мм; -\*- сланцевий газ, футерівка 080 мм; -+ - сланцевий газ, футерівка 230 мм

Хімічний склад газів Дашавського родовища і сланцевого газу [5] наведено на рис. 1.

У розрахунках враховувалося, що при роботі печі вогнетривка цегла, з якої складається футерівка, зношується, і її висота зменшується в процесі роботи печі від 230 до 80 мм.

Згідно з розрахунками, витрата повітря для горіння становить 11,02  $\text{nm}^3/(\text{nm}^3 \text{ газу})$  для природного і 3,23  $\text{nm}^3/(\text{nm}^3 \text{ газу})$  для сланцевого газу.

Визначена теплота згоряння становить 35530  $\text{kJ}/\text{nm}^3$  для природного і 13123  $\text{kJ}/\text{nm}^3$  для сланцевого газу.

На рис. 2 показана залежність витрати природного і сланцевого газів (показано в  $\text{nm}^3/\text{год}$ ) залежно від ступеня зносу футерівки.

З рис. 2 видно, що витрата сланцевого газу істотно вища і перебуває в інтервалі 37000–44718  $\text{nm}^3/\text{год}$ , природного газу – в інтервалі 13820–16328  $\text{nm}^3/\text{год}$ , тобто в 2,68–2,74 рази вище. Підвищене споживання сланцевого газу пояснюється його низькою теплотвірною здатністю, яка, згідно з розрахунками для цього хімічного складу, в 2,7 рази нижча, ніж у природного газу.

Числові значення з розподілу температур газового потоку уздовж печі наведені на рис. 3. Із графіка видно, що максимальне значення температури газового потоку, в зоні спікання печі, при використанні природного газу становить 1700 °C і при зносі футерівки – 1760 °C. Для сланцевого газу відповідно 1980 і 2060 °C. Спостерігається локальне підвищення температури у високотемпературних зонах печі. Це є позитивним фактором, оскільки клінкер приводиться до його пікової температури за рахунок інтенсивного променистого теплообміну, що дає можливість збільшувати продуктивність печі.

На рис. 4 показана температура внутрішньої поверхні

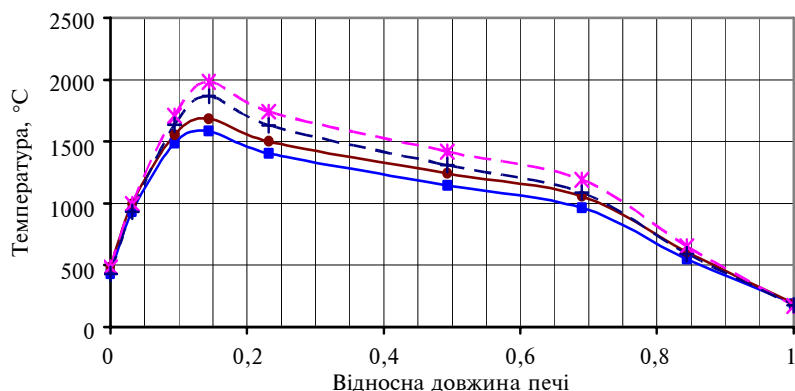


Рис. 4. Температура вогнетриву: —■— дашавський газ, футерівка 080 мм; —●— дашавський газ, футерівка 230 мм; —\*— сланцевий газ, футерівка 080 мм; —+— сланцевий газ, футерівка 230 мм

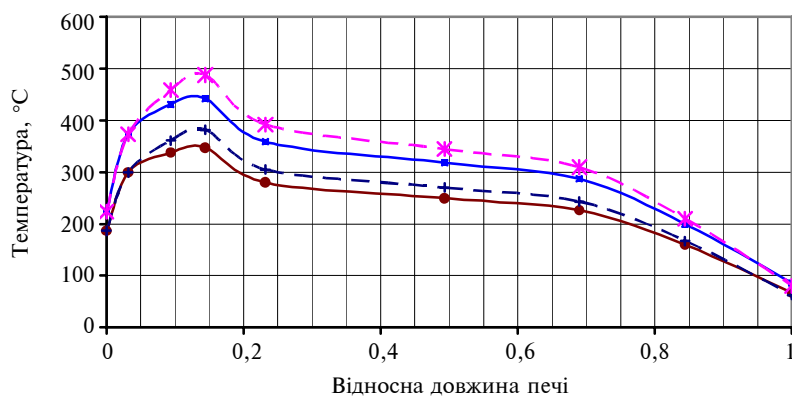


Рис. 5. Температура корпусу: —■— дашавський газ, футерівка 080 мм; —●— дашавський газ, футерівка 230 мм; —\*— сланцевий газ, футерівка 080 мм; —+— сланцевий газ, футерівка 230 мм

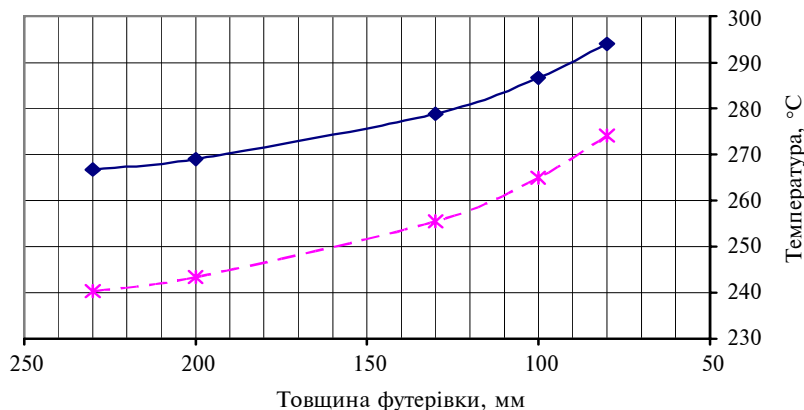


Рис. 6. Температура газів, що відходять: —◆— дашавський газ; —\*— сланцевий газ

футерівки печі (без урахування обмазки). З рисунка видно, що максимальна температура без зносу футерівки становить 1584 °С, а при зносі до 80 мм – 1685 °С для природного газу, для сланцевого газу – 1867 і 1980 °С відповідно.

Таким чином, температура футерівки підвищується на 280–295 °С. При звичайній роботі печі в зоні спікання утворюється захисна обмазка, яка не врахована в розрахунках. Отже, в цьому розрахунку моделюється ситуація, яка виникає на початку роботи печі.

Результати розрахунку температури корпусу печі відносно довжини печі наведено на рис. 5. З даних, наведених на рисунку, слідує, що при використанні сланцевого газу температура корпусу печі на ділянці зони спікання підвищується на 35–45 °С і становить 347 °С для природного та 382 °С для сланцевого газу на початку кампанії печі та відповідно 442 і 487 °С в кінці кампанії (при зносі футерівки до 80 мм).

Також досліджувався вплив хімічного складу газів і ступеня зносу футерівки на температуру газів, що відходять, при постійній продуктивності печі. Результати розрахунку наведено на рис. 6 відносно зносу футерівки. З рисунка видно, що при зносі футерівки температура відхідних газів зростає за нелінійним законом, що викликано збільшенням витрати палива. Для природного газу вона становить 270 °С при товщині футерівки 230 мм і 295 °С при товщині 80 мм. Тепло, додатково отримане за постійної продуктивності, виділяється в навколишнє середовище через корпус печі і з газами, що відходять.

При використанні сланцевого газу температура газів, що відходять, має значення 240 і 274 °С. Таким чином, при використанні сланцевого газу

температура газів, що відходять, зменшилася на 20–30 °С. Зменшення температури для сланцевого газу пояснюється його низькою теплоотою згоряння, інтенсивним використанням тепла в зоні випаровування обертової печі й істотно

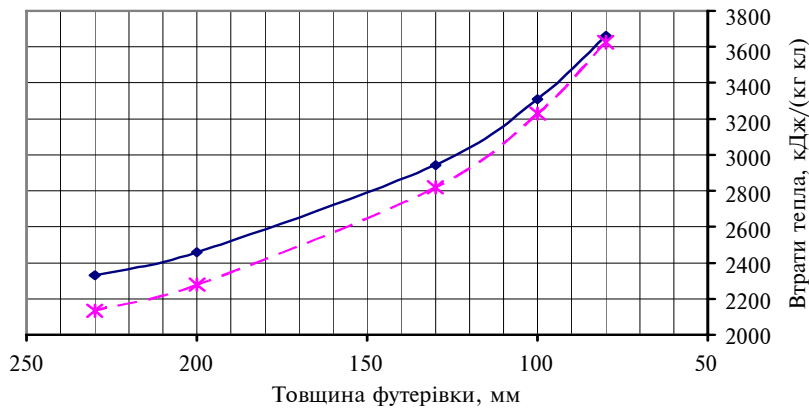


Рис. 7. Загальні втрати тепла: —◆— дашавський газ; —\*— сланцевий газ

меншою кількістю повітря, необхідного для горіння.

Загальні втрати тепла через корпус і з газами, що відходять, відносно зносу футерівки, наведено на рис. 7. З графіків видно, що при використанні природного газу втрати змінюються від 2330 до 3660 кДж/(кг·кл), сланцевого газу — від 2149 до 3576 кДж/(кг·кл). Таким чином, використання сланцевого газу сприяє зменшенню втрати тепла в навколишнє середовище, що пояснюється меншою кількістю повітря, необхідного для горіння палива.

## Висновки

У випадку використання сланцевого газу необхідно враховувати такі відмінності при його застосуванні.

1. При використанні сланцевого газу істотно збільшується кількість палива, яке спалюється (в 2,7 разу), що пояснюється його низькою теплотвірною здатністю. Це вимагає встановлення двох або навіть трьох пальників у пічному агрегаті.

2. Підвищується температура газового потоку в робочому просторі печі. Це є позитивним фактором для випалу цементу, але потре-

бує вибору типу відповідного вогнетриву, який відповідає експлуатаційним характеристикам і витримує більш високі температури (вище на 300 °С).

3. Температура корпусу печі підвищується на 35–45 °С. Зменшити температуру можливо, при використанні типових вогнетривів, за рахунок введення додаткової теплоізоляції.

4. Подача вторинного повітря. Нині в обертових цементних печах ефективно застосовується підігрів вторинного

повітря. При використанні сланцевого газу цей фактор позначиться на зменшенні витрат газу неістотно, оскільки споживання повітря в 3–4 рази менше. Тому необхідне перенастроювання холодильника, вентиляторів і повітроводів, що використовуються в технологічній схемі.

Таким чином, відмінність у хімічному складі природного та сланцевого газів створює проблеми у використанні останнього для діючих обертових печей, які зазвичай розраховані на використання конкретного природного газу. Тому його безпосереднє застосування потребує заміни апаратів або вузлів в конструкції машин. Іншим варіантом є створення комбінованого газу з чітко визначеним хімічним складом за рахунок перемішування сланцевого та природного газів.

У подальших дослідженнях необхідно визначити можливість використання сланцевого газу в печах “сухого” способу виробництва клінкера та змоделювати роботу пічних агрегатів з урахуванням конкретного хімічного складу сланцевого газу, що буде видобуватись на газових родовищах України, зокрема на Юзівському.

1. Древицкий Е.Г., Добровольский А.Г., Коробок А.А. Повышение эффективности работы вращающихся печей. — М.: Стройиздат, 1990. — 224 с.
2. Коржубаев А.Г., Филимонова И.В., Эдер Л.В. Сланцевый газ в системе газообеспечения: сырьевая база, условия освоения и прогноз добычи // Газовая промышленность. — 2012. — № 6. — С. 70–77.
3. Дмитриевский А.Н., Высоцкий В.И. Сланцевый газ — новый вектор развития мирового рынка углеводородного сырья // Там же. — 2010. — № 8. — С. 44–47.
4. S. Stevens and V. Ruuskraa, “Special Report: Gas Shale-1: Seven Plays dominate North America activity”, Oil and Gas J., Sept. 29, pp. 36–41, 2009.
5. Ацетилен и горючие газы. — Режим доступа: [http://metallicheckiy-portal.ru/articles/svarka/gazovaa\\_svarka/acetilen\\_i\\_gorychie\\_gazi](http://metallicheckiy-portal.ru/articles/svarka/gazovaa_svarka/acetilen_i_gorychie_gazi)

6. *Ходоров Е.И.* Печи цементной промышленности. – Л.: Изд-во лит-ры по строительству, 1968. – 458 с. Справочное издание. Кн. 2. – М.: Теплотехник, 2004. – 688 с.
7. *Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев Г.В.* Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология:

Рекомендована Радою  
інженерно-хімічного факультету  
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції  
23 вересня 2013 року