

**О. В. КОШЕЛЬНИК**, канд. техн. наук, с.н.с., ІПМаш НАН України, Харків;  
**О. М. ЗАЄЦЬ**, аспірант, НТУ «ХП», Харків;  
**В. М. КОШЕЛЬНИК**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХП», Харків

## **ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ ТА ТЕМПЕРАТУРИ ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ У ДИМОВОМУ ТРАКТІ ДОМЕННИХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ**

У статті розглянуто питання стосовно можливості утилізації теплоти димових газів, що відходять від доменних повітрянагрівачів. На основі математичного моделювання теплових режимів регенератора визначено параметри теплоносіїв. Здійснено розрахунки та аналіз динаміки зміни температури і витрати відхідних газів по довжині димового тракту блоку доменних повітрянагрівачів з урахування включення чотирьох апаратів у послідовному режимі.

Іл.: 4. Бібліогр.: 13.

**Ключові слова:** Доменні повітрянагрівачі; гази, що відходять; динамічні характеристики, теплоутилізатор

**Вступ. Постановка проблеми у загальному вигляді.** Актуальною сучасною проблемою для України є раціональне використання енергоресурсів, що пов'язано з їх високою вартістю [1]. Особливо актуальним є пошук шляхів з економії паливно-енергетичних ресурсів в металургійному комплексі, зокрема у енергоємному доменному виробництві. Важливою проблемою є підвищення енергоефективності роботи доменних повітрянагрівачів, які забезпечують високотемпературний нагрів дуття для доменних печей. Доменні повітрянагрівачі є апаратами регенеративного типу, мають автономну систему опалення, що забезпечує нагрівання масивної вогнетривкої насадки до температур понад 1350°C. Підвищення коефіцієнта використання палива потребує реалізації заходів з утилізації теплоти димових газів,

© О. В. КОШЕЛЬНИК, О. М. ЗАЄЦЬ, В. М. КОШЕЛЬНИК, 2012  
що виходять з насадки зі змінною температурою від 100 до 400°C.

Реалізація заходів з метою економії паливно-енергетичних ресурсів, дає можливість підвищити рівень температури нагрівання доменного дуття з меншою витратою палива та досягти економії коксу у доменному виробництві.

**Виділення невирішеної частини загальної задачі.** Одним із шляхів підвищення ефективності роботи доменних повітрянагрівачів є утилізація теплоти газів, що відходять з регенераторів у процесі нагрівання вогнетривкої насадки. Складністю при розрахунках теплоутилізатора є визначення температури та витрати цих газів за регенераторами, оскільки з вони постійно змінюються у часі та по довжині димового тракту у результаті послідовного циклічного включення апаратів у режим нагрівання-охолодження насадки.

**Формулюванні мети статті.** Мета роботи полягає в аналізі послідовного режиму роботи доменних повітрянагрівачів та розробці методики визначення динаміки зміни температури та витрати газів, що відходять з насадки регенераторів і змінюються по довжині димового тракту. Ці дані є необхідними

для вибору та розрахунку теплоутилізатора димових газів за блоком доменних повітрянагрівачів.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

З метою економії сировинних ресурсів у доменному виробництві існує тенденція до підвищення температури гарячого дуття, яка може сягати до  $1400^{\circ}\text{C}$  [2-4]. Тому проблемою є удосконалення роботи повітрянагрівачів з метою їх довготривалої та ефективної роботи. Для цього необхідно створити методику для визначення режимних та конструктивних параметрів, що базуються на дослідженнях складних процесів нестационарного теплообміну у доменних повітрянагрівачах. На кафедрі Теплотехніки та енергоефективних технологій НТУ «ХПІ» виконано ряд науково-дослідницьких робіт, що направлені на моделювання режимів роботи регенеративних теплообмінних апаратів плавильних та нагрівальних печей [5,6]. Підвищити ефективність роботи доменних повітрянагрівачів можна також за рахунок оптимізації режимів роботи блоку із декількох повітрянагрівачів [7,8]. На даний час існує реальна можливість підвищення ефективності роботи доменних повітрянагрівачів за рахунок використання теплоти відхідних газів [9].

Топкові системи та теплоутилізаційне обладнання складають окрему галузь теплоенергетичного обладнання. Розроблені різноманітні типи утилізаторів теплоти, що відрізняються рівнем температур попереднього підігріву повітря горіння [10]. Але вибір та розрахунки теплоутилізаторів за доменними повітрянагрівачами необхідно виконувати з урахуванням циклічних нестационарних процесів та зміни параметричних характеристик теплоносіїв.

**Викладення основного матеріалу.** Доменні печі споживають значну кількість дуття, що може сягати від 2000 до 9000  $\text{m}^3/\text{хв}$ . Повітря подається повітродувками та нагрівається в повітрянагрівачах регенеративного типу. Кожна доменна піч має блок із 3-4 повітрянагрівачів.

Режим роботи повітрянагрівачів визначається сукупністю температурних параметрів: витратою палива і розподілом його впродовж газового періоду, температурою купола і максимальною температурою диму в піднасадочному пристрої, яка сягає до  $400^{\circ}\text{C}$ , витратою повітря дуття, часовим режимом, тобто тривалістю газового і дуттьового періодів, тривалістю періоду відокремлення апаратів, коли через насадку повітрянагрівача не рухаються гази, а також режимом дуття [11].

Існує чотири режими дуття: послідовний, паралельний, попарно-паралельний і змішаний. Найпоширенішим режимом роботи повітрянагрівачів у період дуття є

послідовний (рис. 1), тобто коли повітрянагрівачі по черзі, один за іншим, стають на дуття. Після постановки на дуття наступного повітрянагрівача попередній автоматично знімається з режиму дуття. При цьому температура дуття

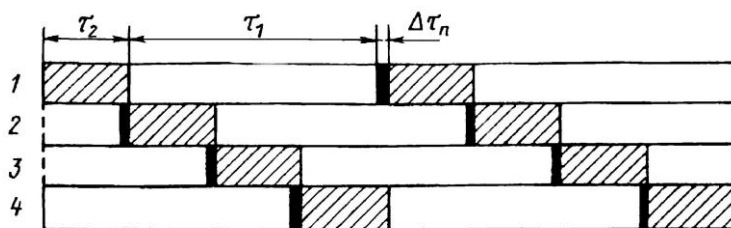


Рис. 1. Графік послідовного режиму роботи блоку із чотирьох регенеративних повітрянагрівачів:

утримується сталою за рахунок змішення з тою частиною холодного дуття, що обминає повітрянагрівач.

Для підвищення ефективності нагрівання дуття необхідне збільшення теплової потужності повітрянагрівачів, що визначається їх ККД і кількістю газу, що спалюється. У свою чергу ККД повітрянагрівачів залежить від різниці температур продуктів горіння під куполом і на виході із насадки. Температура під куполом може бути підвищена при зменшенні коефіцієнта надлишку повітря горіння, завдяки чому зменшується віднесення тепла продуктами горіння, а також при підігріві газу або повітря горіння шляхом використання частини гарячого дуття.

Підвищення температури дуття може бути досягнуте також шляхом скорочення періоду нагрівання дуття. Це, однак, пов'язане з більше частими перекиданнями клапанів і збільшенням відносного часу їхнього перекидання, протягом якого доводиться припиняти нагрівання відповідного повітрянагрівача. Нагрівання дуття можна збільшити також за допомогою підігріву холодного дуття, що додається до гарячого дуття через спеціальний клапан для стабілізації його температури. Цей спосіб еквівалентний збільшенню поверхні нагрівання повітрянагрівачів.

Високоєфективним заходом є реалізація попереднього підігріву повітря й газу згорання для опалення повітрянагрівачів за рахунок утилізації теплоти димових газів, що виходять з насадки регенератора. Це дозволить зменшити втрати теплоти з газами, що відходять, і знизити шкідливий вплив на атмосферу, а також заощадити витрати газового палива.

Температура газів, що йдуть з доменного повітрянагрівача, змінюється у процесі нагрівання насадки в межах 150-500°C. У загальному газоході від чотирьох доменних повітрянагрівачів коливання температури менше – вона становить у середньому 250-400°C [12].

Отже, як було зазначено вище, одним із шляхів підвищення ефективності роботи блоку доменних повітрянагрівачів є утилізація теплоти газів, що відходять. А ключовим моментом в даному разі є визначення динаміки зміни характеристик цих газів. Складність розрахунків безпосередньо рекуператора-теплоутилізатора виникає у процесі визначення температури газів, що відходять з плином часу та вибору оптимального місця встановлення утилізуючого теплообмінника у димовому тракті. Схема підключення блоку доменних повітрянагрівачів представлена на рис.2. На схемі газовідводного тракту указані перерізи, що розглядаються в якості місць для можливого встановлення теплоутилізатора.

$\tau_1$  – тривалість газового періоду, год;  
 $\tau_2$  – тривалість періоду дуття, год;  
 $\Delta\tau_n$  – час перекидання клапанів, год.

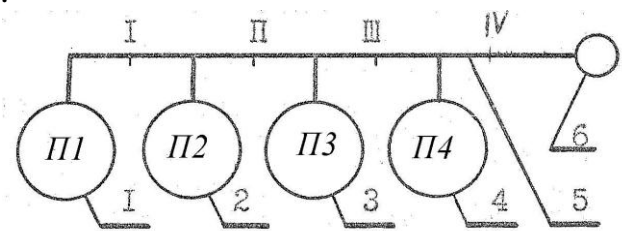


Рис. 2. Схема підключення повітрянагрівачів до димового тракту: 1-4 – доменні повітрянагрівачі; 5 – газівідвідний тракт; 6 – димова труба

Витрата димових газів у відповідних перерізах тракту розраховується як сума витрат всіх працюючих в заданий момент часу повітрянагрівачів у режимі нагрівання насадки за формулою:

$$V_{\text{сум},\tau} = \sum_{i=1}^{n-1} V_{i,\tau} .$$

(1)

Температуру газів можна визначити з урахуванням температур газових потоків від різних повітрянагрівачів які змішуються по тракту без урахування зміни тиску за формулою:

$$T_{\text{сум},\tau} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-1} T_{i,\tau} V_{i,\tau}}{\sum_{i=1}^{i=n-1} V_{i,\tau}} .$$

(2)

Теплотехнічні розрахунки параметрів газу були проведені на основі даних математичного моделювання режимів роботи доменних повітрянагрівачів у послідовному режимі з тривалістю періодів нагрівання –  $\tau_1 = 2,9$  год, дуття –

$\tau_2 = 1$  год, перекидання клапанів –  $\Delta\tau_n = 0,1$  год.

На рис. 3 показано характер зміни температури димових газів на виході із насадки регенераторів перед димовим трактом у послідовному режимі включення у процесах нагрівання вогнетривкої насадки. Коливання температури одного повітрянагрівача складає  $289^\circ\text{C}$ .

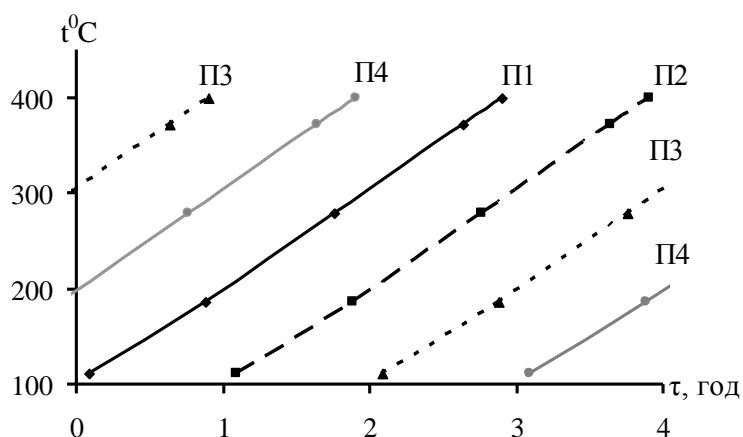
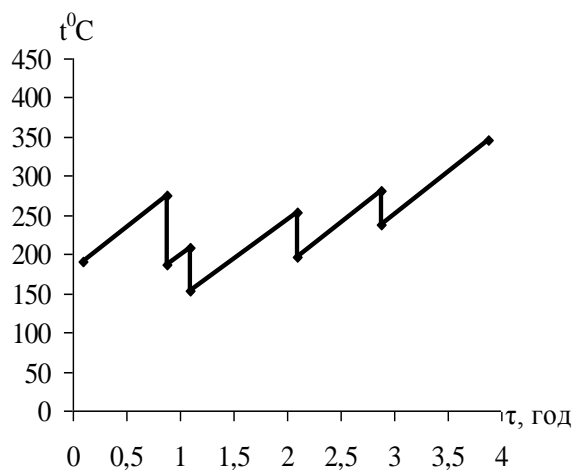
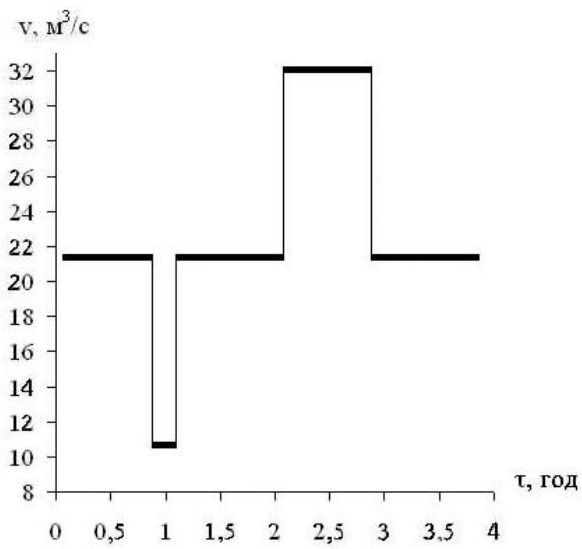


Рис. 3. Динаміка зміни температури димових газів на виході насадки регенераторів

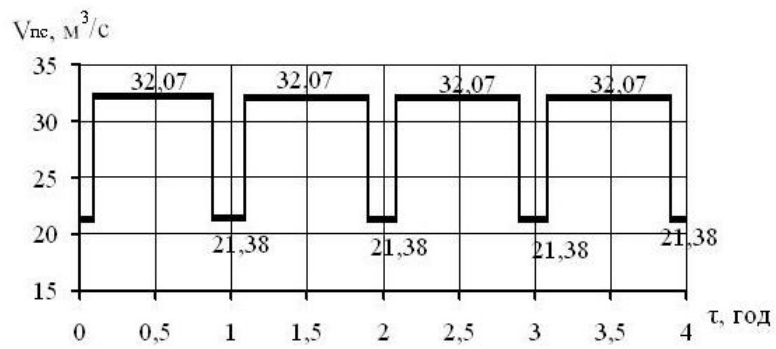
На рис. 4 показано динаміку зміни витрати і температури димових газів відповідно у перерізах 3 та 4. Ці перерізи є найбільш привабливими з точки зору мінімізації коливань температури по димовому тракту для установки теплоутилізатора. Як видно із представлених даних, мають місце значні коливання витрати і температури газів після змішування газових потоків з відповідними температурами.

Для використання теплоти газів, що відходять з регенераторів, пропонується використати рекуперативні теплообмінники. Аналіз результатів розрахунків показав, що найбільш доцільним з точки зору зменшення коливання параметрів димових газиків у димовому тракті є установка теплоутилізатора у перерізі IV, де ці коливання будуть найменшими.



a)

б)



в)

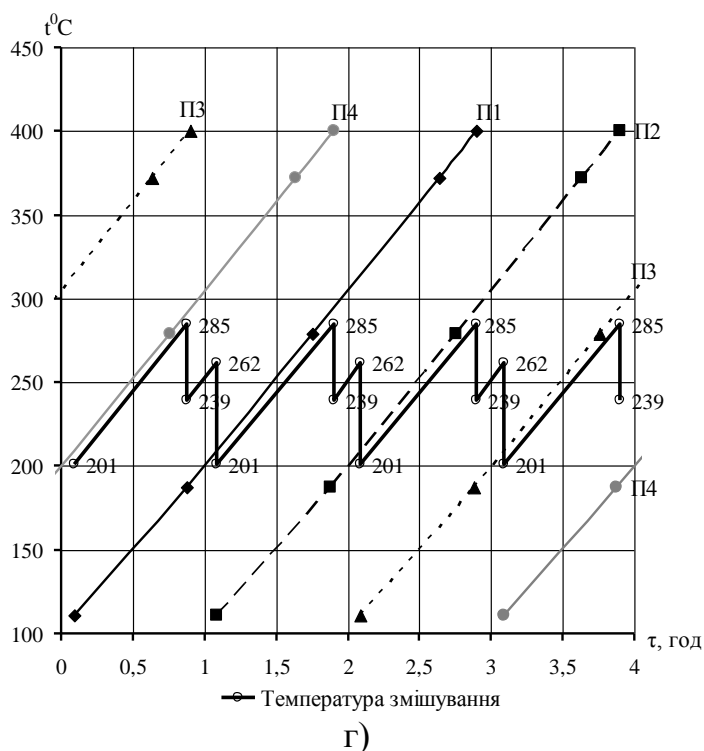


Рис. 4. Зміни витрати та температури димових газів за цикл в характерних перерізах димового тракту регенераторів  
 а) - витрата димових газів для III перерізу, б) - температура димових газів для III перерізу; в) - витрата димових газів для IV перерізу, г) – температура димових газів для IV перерізу

Попередні теплотехнічні розрахунки показали, що для заданих даних може бути використано двохсекційний рекуперативний апарат з площею теплообміну  $F = 580 \text{ м}^2$  [13].

**Висновок.** Результати виконаних досліджень дозволили визначити динаміку зміни витрати і температури димових газів по довжині димового тракту блоку доменних повітрянагрівачів регенеративного типу для послідовного режиму роботи. Ці дані є основою для теплотехнічних розрахунків рекуперативних теплоутилізаторів.

**Список літератури :** 1. BP Statistical Review of World Energy June 2011. – Режим доступу: [http://www.bp.com/assets/bp\\_internet/globalbp/globalbp\\_uk\\_english/reports\\_and\\_publications/statistical\\_energy\\_review\\_2011/STAGING/local\\_assets/pdf/statistical\\_review\\_of\\_world\\_energy\\_full\\_report\\_2011.pdf](http://www.bp.com/assets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2011.pdf). 2. Гольдфарб Э. М. Закономерности прогресса насадки и пути повышения температуры доменного дутья / Э. М. Гольдфарб // Изв. Вузов – 1960. – № 3. – С. 148 – 156. 3. Работа доменной печи с нагревом дутья до 1200 – 1380<sup>0</sup>С / А. А. Шокул, В. П. Лозовой и др. // Сталь. – 1978. – № 2. – С. 10 – 13. 4. Планка Б. Повышение температуры дутья в доменных печах/ Б. Планка // Сталь. – 1982. – № 4. – С. 14–19. 5. Кошельник В. М., Кошельник А. В. Уточненная математическая модель доменного воздухонагревателя. Вестник ХГПУ, Вып.49.-Харьков:ХГПУ, 1999, с.113 – 117. 6. Кошельник О. В. Особливості розрахунків процесів складного теплообміну в регенеративних теплообмінниках з нерухомою вогнетривкою насадкою нагрівальних і плавильних печей / О. В. Кошельник // Промышленная теплотехника. – Т. 30, № 3. – 2008.– С. 33 – 40. 7. Соломенцев С. Л. Упрощенный метод оптимизации режимов работы блока доменных воздухонагревателей / С. Л. Соломенцев, В. Д. Коршиков // Сталь. – 1985. – №

6. – С. 16 – 18. **8.** Монкерт Х. Новая система оптимизации управления доменными воздухонагревателями / Х. Монкерт, М. Фосс и др. // Черные металлы. – 1994, окт. – С. 16 – 23. **9.** Пальц Г. Использование тепла отходящих газов для нагрева дутья / Г. Пальц // Черные металлы. – 1984. – № 19. – С. 23 – 30. **10.** Сорока Б. С. Системы сжигания и теплоутилизационные устройства технологических печей: Современное состояние и мировые тенденции развития / Б. С. Сорока // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – № 12. – С. 54 – 68. **11.** Доменные воздухонагреватели (конструкция, теория, режимы работы) / Шкляр Ф. Р., Малкин В. М., Капитанова С. П. и др. – М.: Metallurgy, 1982. – 176 с. **12.** Сазанов Б. В. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий: Учебн. пособие для вузов / Б. В. Сазанов, В. И. Ситас. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 304 с. **13.** Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Тези доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції. Ч. I (15-17 травня 2012 р. Харків) / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л. Л. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 246.

---

УДК 669.162.23:536.21

**Особенности определения расхода и температуры продуктов сгорания в дымовом тракте доменных воздухонагревателей/ Кошельник А. В., Заец Е. Н., Кошельник В. М.** // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012. – № 50(956). С.133-139.

Произведен расчет и выполнен анализ динамики изменения температуры и расхода отходящих газов по сечениям дымового тракта блока воздухонагревателей. В статье показана возможность использования теплоты отходящих газов доменных воздухонагревателей. Ил.: 4. Библиогр.: 13.

**Ключевые слова:** Доменные воздухонагреватели; отходящие газы; динамические характеристики, теплоутилизатор.

UDC 669.162.23:536.21

**Determination features of flow rate and temperature of combustion products in the waste-gas pipeline of the hot blast stoves/ Koshelnik O. V., Zayets O. M., Koshelnik V. M.** // Bulletin of NTU “KhPI”. Subject issue: New decisions of modern technologies. – Kharkov: NTU “Khpi”. – 2012. – № 50(956). P.133-139

The calculation and analysis of temperature and flow rate of waste gas in sections of the block stoves pipeline were made. The paper shows the possibility of using heat of waste gas of blast stoves. Im.: 4. Bibliogr.: 13.

**Key words:** Hot blast stoves; waste gases; dynamic characteristics, heat exchanger.

Надійшло до редакції  
21.09.2012