

Національна академія наук України
Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного

ЗАЄЦЬ ОЛЕНА МИКОЛАЇВНА



УДК 669.162.231:658.576.1

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
НАГРІВУ ДУТТЄВОГО ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ
ПРОДУКТІВ ГОРІННЯ**

Спеціальність 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова
теплоенергетика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Ганжа Антон Миколайович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», завідувач кафедри теплотехніки
та енергоефективних технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Губинський Михайло Володимирович,
Національна металургійна академія України, м. Дніпро,
завідувач кафедри промислової теплоенергетики;

кандидат технічних наук
Тарасова Вікторія Олександрівна,
Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного
НАН України, м. Харків, старший науковий співробітник
відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів.

Захист відбудеться «22» лютого 2018 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02 в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10.

Автореферат розісланий «15» січня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02
кандидат технічних наук
старший науковий співробітник



С. В. Альохіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Металургія є однією з базових галузей економіки України. При цьому доменне виробництво споживає значну частину енергетичних ресурсів металургії і характеризується більш високою енергоємністю порівняно з іншими країнами через їх неефективне використання.

При виробництві чавуну експлуатуються системи високотемпературного нагріву дуття, що складаються з блоку доменних повітрянагрівачів, в яких спалюється доменний газ. Для забезпечення проектної температури під куполом доменного повітрянагрівача теплоти згоряння доменного газу недостатньо, тому його збагачують природним або коксовим газом, які є високовартісними енергетичними ресурсами. В ході експлуатації блоку повітрянагрівачів утворюються димові гази, теплота яких наразі в нашій країні утилізується недостатньо, в деяких випадках – не утилізується зовсім. Ці гази мають порівняно низький температурний потенціал – 200-300 °С, але їх об'ємні витрати є значними, що створює передумови для впровадження та вдосконалення систем утилізації їх теплоти.

Для використання цієї теплоти повинні створюватися системи утилізації з метою підігріву компонентів горіння доменних повітрянагрівачів і, відповідно, скорочення обсягів споживання високовартісної добавки (природного чи коксового газу) та зменшення негативного навантаження на навколишнє середовище. Тому задачі створення комплексу методів, нових залежностей та засобів для розробки, аналізу і удосконалення систем утилізації теплоти, яка відходить від доменного виробництва з метою підвищення ефективності роботи систем високотемпературного дуття доменного виробництва є наразі актуальними.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота була виконана на кафедрі теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» в рамках держбюджетних тем Міністерства освіти і науки України «Розробка теоретичних основ створення енергоефективних теплоутилізаційних комплексів на базі високотемпературних агрегатів з використанням когенераційних технологій» (2011-2012 рр., № 0110U001235), «Розробка енергоефективних комплексних систем утилізації теплових вторинних ресурсів високотемпературних енерготехнологічних процесів» (2015-2016 рр., № 0115U000523), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів. Напрямок досліджень відповідає «Енергетичній стратегії України на період до 2030 р.», схваленій розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 1071, та напряму «Технології використання скидних енергоресурсів», що значиться в постанові Кабінету Міністрів України від 27.09.2011 № 942 «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 р.».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності високотемпературного нагріву доменного дуття за рахунок утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів для підігріву їх компонентів горіння.

Для реалізації мети поставлені такі завдання:

1. Визначення динамічних параметрів димових газів блоку доменних повітрянагрівачів, а саме – визначення температури і витрати димових газів в загальному газоході після блоку доменних повітрянагрівачів.

2. Встановлення взаємозалежності необхідних температур підігріву повітря горіння та частки коксового газу в паливі.

3. Одержання функціональних залежностей теплофізичних параметрів компонентів димових газів, повітря та компонентів палива від температури та тиску для зручності розрахунків на ЕОМ.

4. Удосконалення математичної моделі, методу та засобів розрахунку теплообмінного обладнання системи утилізації.

5. Синтез та аналіз схем систем утилізації, що базуються на використанні рекуператорів.

6. Побудова температурних діаграм поверхні теплообміну та виявлення недоліків і «вузьких» місць в теплообмінниках при їх експлуатації.

7. Оцінка ефективності роботи систем утилізації, їх порівняльний аналіз.

Об'єкт дослідження. Процеси в теплообмінному обладнанні доменного виробництва з системою утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів.

Предмет дослідження. Система утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів та її теплообмінне обладнання.

Методи дослідження. Математичне моделювання процесів гідроаеродинаміки та теплопередачі, чисельний експеримент, аналіз.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі створено комплекс математичних моделей, нових залежностей та засобів для розробки, аналізу і удосконалення систем утилізації теплоти, яка відходить від доменного виробництва. У ході створення цих моделей, методів і засобів були одержані такі наукові результати:

1. Для утилізаторів теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів розроблено удосконалений метод розрахунку складних рекуперативних теплообмінників зі змішаним рухом потоків теплоносіїв, який ґрунтується на поділі поверхні теплообміну на базові мікротеплообмінники, де використовується P-NTU-метод розрахунку.

2. Вперше для теплоутилізаторів теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів враховано зміну теплофізичних властивостей газів, палива та повітря за напрямком руху потоків теплоносіїв та поверхні теплообміну, зміну параметрів теплопередачі та гідродинаміки всередині теплообмінника, що дозволило уточнити їх тепловий стан при різних режимах роботи.

3. Вперше при розрахунку теплоутилізаторів теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів визначено області можливого виникнення корозійного зносу їх поверхні. При цьому враховано режими роботи теплоутилізаторів та фактори їх експлуатації (відкладення чи забруднення поверхні).

4. На базі методу дискретного розрахунку параметрів доменних повітрянагрівачів, які працюють у нестаціонарному (циклічному) режимі, вперше розроблено підхід до розрахунку динамічних характеристик та параметрів димових

газів у загальному газоході з урахуванням взаємного впливу повітрянагрівачів у блоці.

5. Отримано нові апроксимаційні залежності теплофізичних властивостей кожного компоненту продуктів горіння, палива та повітря, а також уточнені залежності визначення властивостей суміші газів від температури і тиску, що вперше дозволило застосовувати розроблені методи і засоби розрахунку для будь-яких складів теплоносіїв у теплообміннику.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані у дисертаційній роботі результати мають таке практичне значення:

1. Застосування розробленої більш досконалої математичної моделі та засобів розрахунку теплоутилізаторів доменних повітрянагрівачів дозволяє більш точно визначити параметри теплоносіїв та поверхні при їх експлуатації, що забезпечить проведення аналізу ефективності та надійності існуючих теплообмінників, тих, що модернізуються, або проектується. Це призводить до зменшення використання дорогого коксового чи природного газу у собівартості продукції та зменшення негативного впливу на оточуюче середовище.

2. Розроблені методи та засоби дозволяють виявити місця можливого корозійного зносу поверхні теплообмінників-теплоутилізаторів з урахуванням умов експлуатації, режимів роботи та розробити і перевірити рекомендації та заходи зі зменшення чи уникнення цього зносу, у тому числі – з перекомпонування апаратів чи всієї системи утилізації.

3. За допомогою розроблених методів та засобів моделювання роботи блоку доменних повітрянагрівачів отримано залежність необхідної частки коксового газу від температури підігріву повітря і палива та температури газів, що відходять, у загальному газоході, які є вихідними даними для розробки і аналізу роботи системи утилізації теплоти.

4. Розроблені математичні моделі, методи і засоби аналізу поверхневих теплоутилізаторів зі складною змішаною схемою руху потоків теплоносіїв є універсальними для теплообмінників, де теплоносіями є суміші газів, повітря, водяна пара (або вода) і можуть бути застосовані для автоматизованих розрахунків теплоутилізаторів на ЕОМ.

5. Розроблені математичні моделі, методи і засоби використовуються у навчальному процесі кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій НТУ «ХП» (акт впровадження від 21.06.2017). Методи та засоби підвищення ефективності систем утилізації скидної теплоти доменного виробництва були використані при розв'язанні задач зменшення питомих витрат коксового газу на об'єктах металургійної промисловості (довідка від ПрАТ «ВТП «УКРЕНЕРГОЧОРМЕТ» № 1046/40 від 20.06.2017).

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення та результати отримані здобувачем особисто. У роботах, що виконані у співавторстві: автором виконано постановку проблеми щодо утилізації теплоти продуктів горіння доменних повітрянагрівачів [4]; запропоновано метод розрахунку динамічних характеристик продуктів згоряння у димовому тракті доменних повітрянагрівачів [7], наведено результати розрахункового дослідження та визначено ці параметри [1]; запропоновано метод визначення режимних параметрів димових газів

регенеративних доменних повітрянагрівачів [2] та прогнозування теплових режимів доменних регенеративних повітрянагрівачів [8]; запропоновано методику визначення рекуперованої теплоти в утилізаторах [3] та застосовано удосконалену методику для розрахунку рекуператорів-утилізаторів теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів [9]; описано вдосконалену математичну модель процесів в утилізаторі теплоти димових газів після блоку доменних повітрянагрівачів [10]; наведено результати розрахункового дослідження системи утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів зі застосуванням удосконаленої математичної моделі, що базується на поділі поверхні теплообміну на мікротеплообмінники з подальшим їх розрахунком з урахуванням схеми руху теплоносіїв за допомогою P - NTU -метода, побудовано температурні діаграми поверхні теплообміну [6]; запропоновано методику для оцінки ефективності систем утилізації [11]. У роботі, опублікованій без співавторів [5], встановлено вплив частки коксового газу на необхідний рівень підігріву компонентів горіння доменних повітрянагрівачів.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення та результати дисертації доповідались та обговорювалися на: XX, XXI, XXIV, XXV Міжнародних науково-технічних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2012, 2013, 2016, 2017 рр.); IX та XII Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми енергозбереження та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2013 р., 2016 р.); XVI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології» (м. Одеса, 2016 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи відображено у 11 публікаціях: з них 6 – у наукових періодичних фахових виданнях України, з яких 3 – у наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 5 – у матеріалах та тезах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з: анотації, вступу, 4 розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації – 223 сторінки, 78 рисунків, з них 38 рисунків на окремих сторінках, 36 таблиць, з них 19 таблиць на окремих сторінках, список використаних джерел з 152 найменувань на 16 сторінках, 3 додатки на 8 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраного в дисертації напрямку досліджень, висвітлено зв'язок з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету і задачі дисертації, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наведено наукову новизну та практичну значущість роботи, відомості про особистий внесок здобувача та про апробацію та публікації основних результатів дисертації.

В **першому розділі** виконано огляд загальної схеми доменного виробництва та типових моделей доменних повітрянагрівачів: з внутрішньою та зовнішньою камерою згоряння, безшахтних. Розглянуто прийоми підвищення ефективності роботи систем нагріву доменного дуття. Описано принцип та особливості роботи та розрахунку регенеративного повітрянагрівача. Виконано огляд основних

конструкцій теплообмінників, що можуть застосовуватися для утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів: регенераторів, рекуператорів з гладкими та оребреними трубами, теплообмінників на теплових трубах, з проміжним теплоносієм.

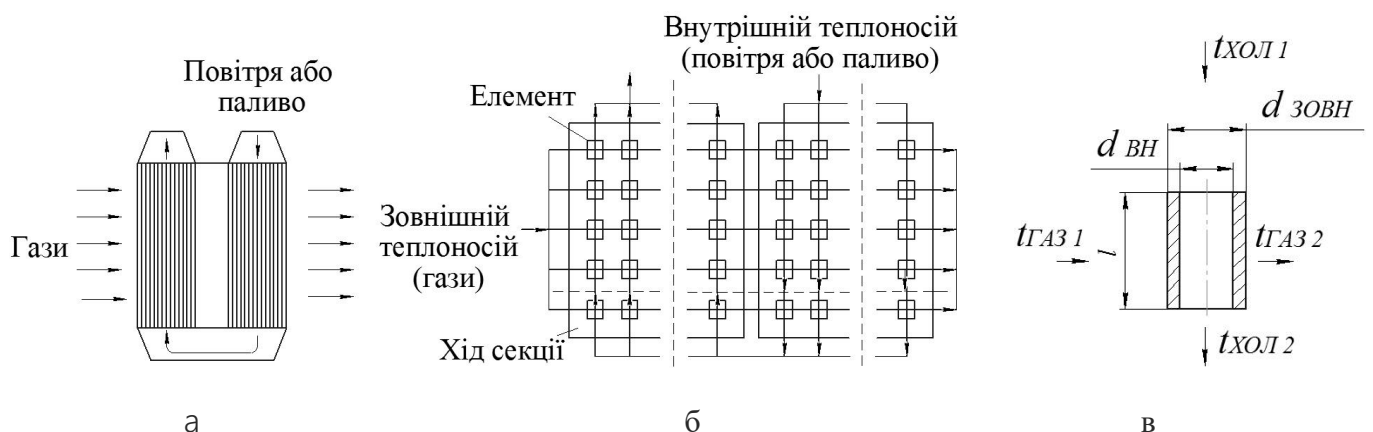
Відмічено, що вагомий внесок у розв'язання проблеми підвищення ефективності систем високотемпературного нагріву дуття доменного виробництва зробили відомі вчені Гольдфарб Е. М., Флейшман Ю. М., Советкін В. Л., Шкляр Ф. Р., Малкін В. М., Каштанова С. П., Калугін Я. П., Бянкін І. Г., Соломенцев, С. Л., Грес Л. П., Каракаш Є. О., Карпенко С. А., Міленіна О. Є. та ін.

На базі ретельного огляду суті проблеми сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи.

В другому розділі виконано огляд та порівняння основних методів розрахунку рекуперативних теплообмінників: ε -NTU-метод, P-NTU-метод, метод поправкового коефіцієнту. Обґрунтовано застосування цих методів до рекуперативних теплоутилізаторів доменного виробництва і проведено їх удосконалення та доповнення.

Теплообмінники, що запропоновано задіяти в системах утилізації, є двосекційними рекуператорами з гладкими трубами та протиточною схемою руху теплоносіїв. Теплообмінники є двоходовими за напрямком руху повітря чи палива та однокеровими за напрямком руху димових газів. Теплоносій, що нагрівається (паливо чи повітря) направляється в трубки, теплоносій, що нагріває (димові гази) – між ними в поперечному напрямку. За потреби теплоносії можна міняти місцями.

Описано удосконалену математичну модель, що вперше застосовується для розрахунку рекуператорів в системах утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів, яка базується на поділі поверхні теплообміну на мікротеплообмінники (1)-(16). При цьому кожний з них розраховується P-NTU-методом. Наведено розрахункові схеми (рис. 1).



а – конструкція;
б – розрахункова схема;
в – розрахункова схема елемента.

Рисунок 1 – Схема теплообмінника

Ефективність (характеристичний параметр)

$$P_{ХОЛ}^E = \frac{1}{\frac{1}{1 - e^{-NTU_2^E}} + \frac{R_{ХОЛ}^E}{1 - e^{-R^E \cdot NTU_2^E}} - \frac{1}{NTU_2^E}}, \quad (1)$$

де відношення водяних еквівалентів (характеристичний параметр)

$$R_{ХОЛ}^E = \frac{t_{ГАЗ1}^E - t_{ГАЗ2}^E}{t_{ХОЛ2}^E - t_{ХОЛ1}^E} = \frac{W_{ХОЛ}^E}{W_{ГАЗ}^E}, \quad (2)$$

число одиниць переносу теплоти

$$NTU_2^E = \frac{k^E \cdot F_{ХОЛ}^E}{W_{ХОЛ}^E}. \quad (3)$$

Середні в елементі (локальні) температури

$$\bar{t}_{ХОЛ}^E = t_{ХОЛ1}^E + \mathcal{G}_{ХОЛ}^E \cdot (t_{ГАЗ1}^E - t_{ХОЛ1}^E), \quad (4)$$

$$\bar{t}_{ГАЗ}^E = t_{ГАЗ1}^E - \mathcal{G}_{ГАЗ}^E \cdot (t_{ГАЗ1}^E - t_{ХОЛ1}^E), \quad (5)$$

де $\mathcal{G}_{ХОЛ}^E$, $\mathcal{G}_{ХОЛ}^E$ – відносні середні температури

$$\mathcal{G}_{ХОЛ}^E = P_{ХОЛ}^E \cdot \left(\frac{1}{1 - e^{-NTU_2^E}} - \frac{1}{NTU_2^E} \right), \quad (6)$$

$$\mathcal{G}_{ГАЗ}^E = P_{ГАЗ}^E \cdot \left(\frac{R_{ГАЗ}^E}{1 - e^{-R_{ГАЗ}^E \cdot NTU_2^E}} - \frac{1}{NTU_2^E} \right). \quad (7)$$

Температури на виході з елементу (1 – вхід, 2 – вихід)

$$t_{ХОЛ2}^E = t_{ХОЛ1}^E + P_{ХОЛ}^E (t_{ГАЗ1}^E - t_{ХОЛ1}^E), \quad (8)$$

$$t_{ГАЗ2}^E = t_{ГАЗ1}^E - P_{ХОЛ}^E \cdot R_{ХОЛ}^E (t_{ГАЗ1}^E - t_{ХОЛ1}^E). \quad (9)$$

Щільність теплового потоку

$$q^E = k^E \cdot (\bar{t}_{ГАЗ}^E - \bar{t}_{ХОЛ}^E). \quad (10)$$

Температури стінок з боку газів та холодного теплоносія у кожному елементі

$$t_{СТ1}^E = \bar{t}_{ГАЗ}^E - \frac{q^E}{\alpha_{ГАЗ}^E}, \quad t_{СТ2}^E = \bar{t}_{ХОЛ}^E + \frac{q^E \cdot d_{ЗОВН}}{\alpha_{ХОЛ}^E \cdot d_{ВН}}. \quad (11)$$

У системі рівнянь коефіцієнт теплопередачі у кожному елементі

$$k^E = \frac{1}{d_{CEP} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{ХОЛ} \cdot d_{BH}} + \frac{1}{2\lambda_{CT}} \ln \frac{d_{3OBH}}{d_{BH}} + \frac{1}{\alpha_{ГАЗ} \cdot d_{3OBH}} \right) + R_3}. \quad (12)$$

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі до чи від стінки труби

$$\alpha = \alpha^K + \alpha^{ВИПР}. \quad (13)$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією

$$\alpha^K = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}. \quad (14)$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням

$$\alpha^{ВИПР} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\varepsilon_3 + 1}{2} \cdot \varepsilon_\Gamma \cdot T_\Gamma^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_{cm}}{T_\Gamma} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_{cm}}{T_\Gamma}}. \quad (15)$$

Сумарні втрати тиску за напрямком руху теплоносіїв (від тертя та місцеві)

$$\Delta p = \frac{\rho \omega^2}{2} \sum \xi. \quad (16)$$

Число Нуссельта Nu для теплообміну конвекцією та коефіцієнти втрат від тертя, що використовуються при визначенні гідравлічного опору ξ всередині та ззовні труб, визначаються за відповідними критеріальними рівняннями у залежності від режиму течії теплоносія (турбулентний, перехідний чи ламінарний) з урахуванням рівняння нерозривності.

Температури теплоносіїв, витрати та тиски на вході у кожний елемент вибираються чи розраховуються згідно схеми з'єднання елементів у апараті.

Також розроблено математичну модель та описано процедуру гідравлічного розрахунку рекуператорів, який проводиться одночасно з тепловим.

Для можливості виконання розрахунків на ЕОМ табличні дані теплофізичних властивостей компонентів палива, димових газів та повітря апроксимовано та представлено у вигляді функціональних залежностей.

Таким чином, запропонована математична модель являє собою складну неявну систему нелінійних рівнянь, розв'язання якої проводиться методом послідовних наближень до виконання досягнення неперевикнення заданої розбіжності по тепловому балансу, теплопередачі та втрат тисків у всьому апараті.

Третій розділ присвячено моделюванню роботи повітрянагрівачів. Розглянуто систему підігріву доменного дуття, що складається з трьох повітрянагрівачів з виносною камерою згоряння. Розраховано процес горіння палива – доменного газу, збагаченого висококалорійним коксовим газом, визначено склад димових газів.

Встановлено, що без підігріву компонентів горіння частка коксового газу повинна сягати 16 % для забезпечення калориметричної температури під куполами

доменних повітрянагрівачів. Знижуючи частку коксового газу в паливі, встановлено взаємозалежність необхідних температур підігріву повітря горіння (при підігріві палива та повітря одночасно, лише повітря) від частки коксового газу. Розглянуто два характерних періоди роботи: зимовий та літній, коли температура повітря становить 3°C та 33°C (рис. 2, 3). При цьому початкова температура палива складала 50°C , температура підігріву палива – 170°C . Ці параметри обумовлені технологічними особливостями.

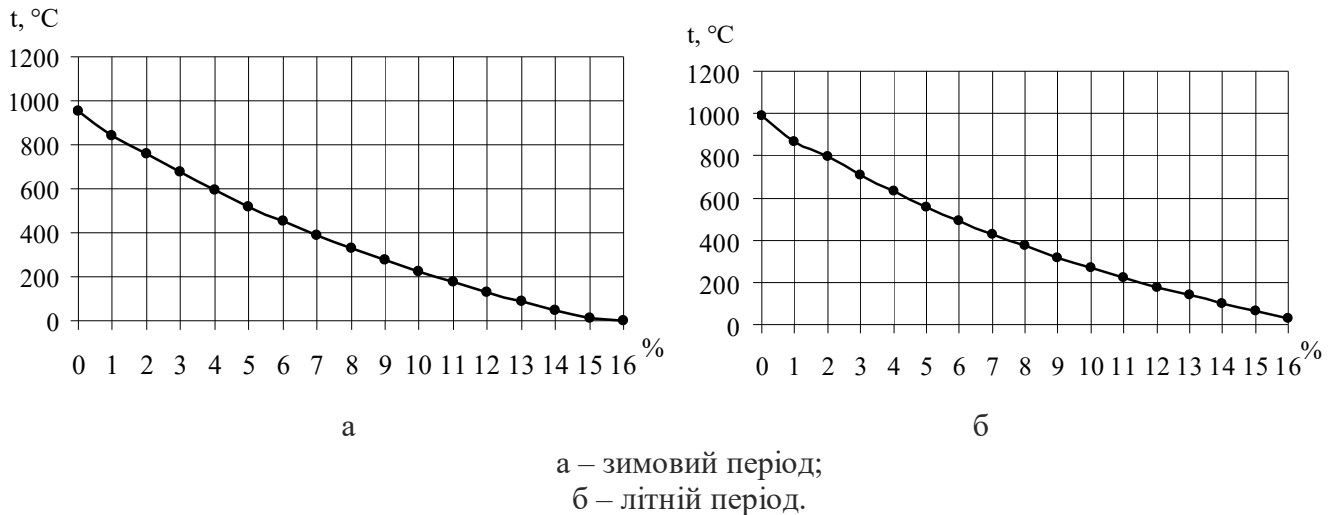


Рисунок 2 – Необхідна температури підігріву повітря горіння у випадку підігріву лише повітря

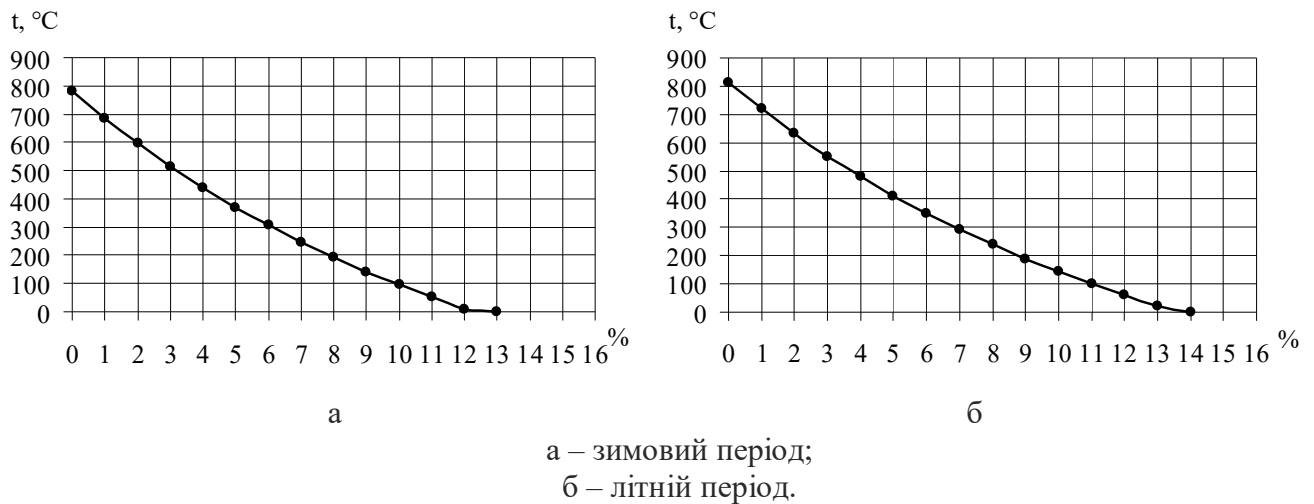


Рисунок 3 – Необхідна температури підігріву повітря горіння у випадку підігріву повітря та палива

На основі отриманої залежності за допомогою програми, створеної на кафедрі теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», розраховано регенератор, отримано значення витрат компонентів горіння для одного повітрянагрівача (рис. 4-б) та температуру димових газів, що зростає протягом газового періоду для всіх випадків від 90°C до 400°C .

З огляду на те, що повітрянагрівачі працюють в послідовному режимі, отримано значення динамічних параметрів в загальному газоході після блоку повітрянагрівачів. Встановлено, що температура за часом змінюється за пилоподібною кривою (рис. 7), а залежність витрати димових газів від часу носить ступінчастий характер (рис. 8). При цьому середня температура димових газів для всіх випадків становить 246 °С.

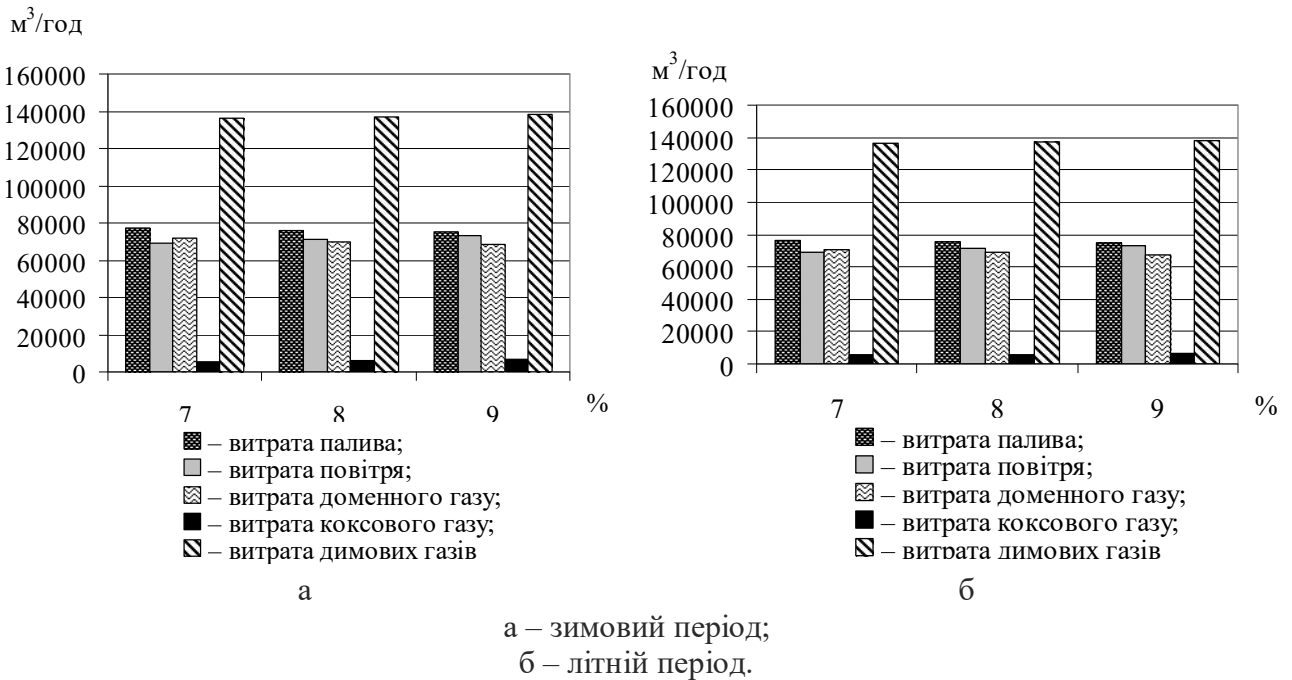


Рисунок 4 – Витрата компонентів горіння та димових газів при підігріві повітря та палива

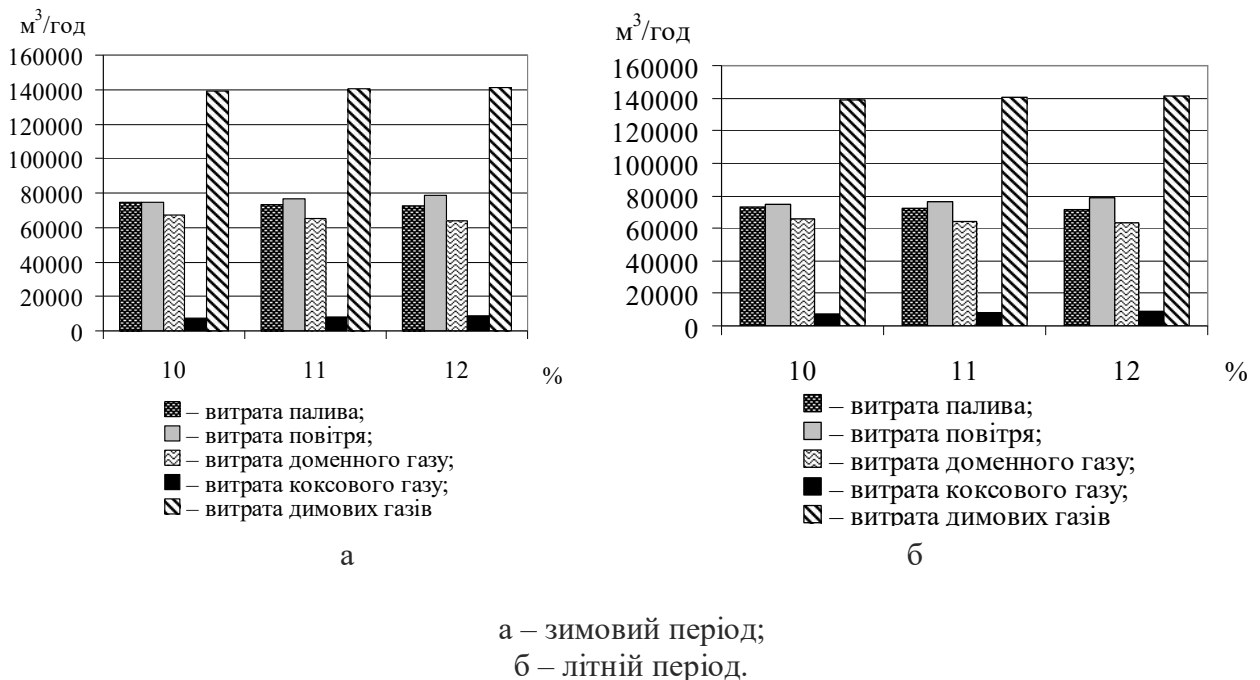


Рисунок 5 – Витрата компонентів горіння та димових газів при підігріві лише повітря

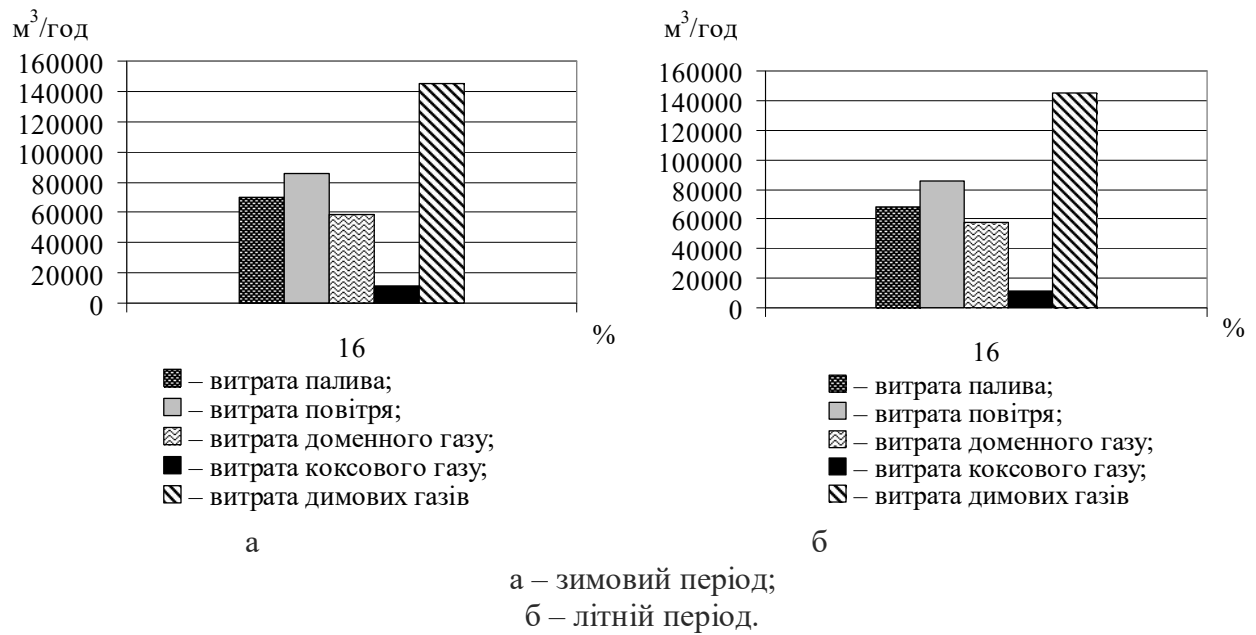


Рисунок 6 – Витрата компонентів горіння та димових газів при відсутності підігріву компонентів горіння

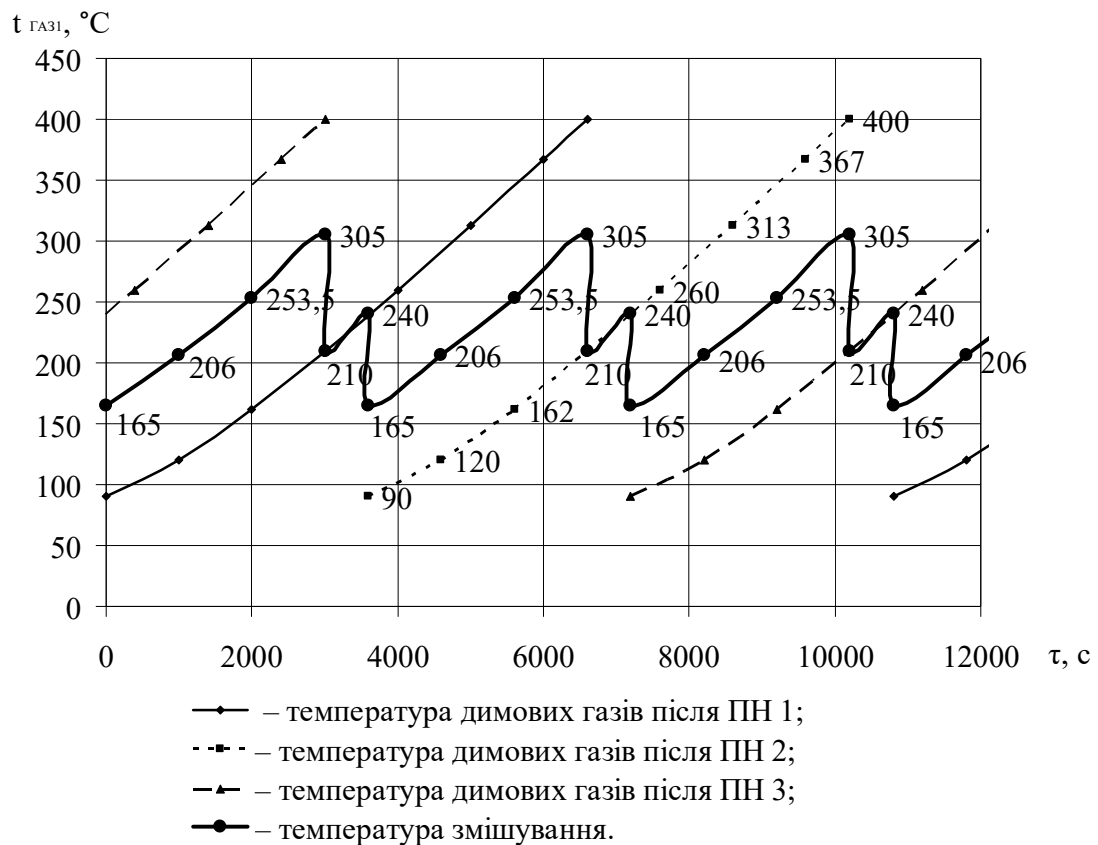


Рисунок 7 – Температура димових газів блоку повітрянагрівачів в залежності від часу

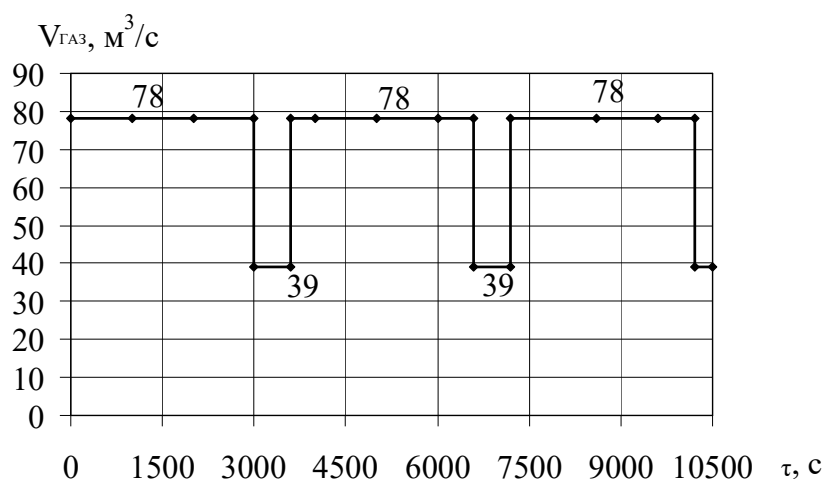


Рисунок 8 – Витрата димових газів при роботі трьох повітрянагрівачів в залежності від часу

При розрахунку систем утилізації витрату димових газів, повітря та палива приймали як суму для кількості одночасно працюючих повітрянагрівачів (подвоювали). Було обрано перспективні варіанти в рамках співвідношення частки коксового газу та температур підігріву компонентів горіння. Так систему утилізації для одночасного підігріву палива і повітря розглядали у зимовий та літній періоди, змінюючи частку коксового газу з 7 % до 9 %. А для систем, що слугують для підігріву тільки повітря, частку коксового газу варіювали в межах 10-12 %.

На основі запропонованої методики розрахунку рекуперативних теплоутилізаторів (розділ 2) була створена розрахункова програма. Теплофізичні властивості повітря, димових газів та палива, що являють собою суміші газів, визначалися в кожному елементі теплообмінника з урахуванням середніх їх температур, тисків в ньому. Для повітря, що подається вентилятором, враховувалась зміна його відносної вологості. Для газів, що надходять від регенераторів, та палива обирався їх склад з урахуванням об'ємного вмісту кожного компоненту. Метод дискретного розрахунку дав можливість визначити температури поверхонь стінок, як зсередини, так і ззовні у кожній точці (з урахуванням поділу) за напрямком руху теплоносіїв. Додатково визначалась різниця між температурою насичення водяної пари (при парціальному тиску у газах, що відходять) та температурою зовнішньої стінки у даному місці для виявлення областей можливого випадіння вологи та виникнення корозії у теплообмінниках.

Четвертий розділ присвячено аналізу отриманих результатів розрахунку та визначенню показників ефективності систем утилізації на різних режимах. Було розроблено чотири схеми систем утилізації:

- для одночасного підігріву компонентів горіння (палива та повітря) у двох окремих рекуператорах (рис. 9);
- для підігріву повітря горіння в одному рекуператорі (рис. 10);
- для підігріву повітря горіння у двох рекуператорах, що ввімкнені паралельно за напрямком руху повітря (рис. 11);
- для підігріву повітря горіння у двох рекуператорах, що ввімкнені послідовно за напрямком руху повітря (рис. 12).

У результаті розрахунку за запропонованим методом (розділ 2) були побудовані діаграми розподілу температур теплоносіїв за поверхнею теплообміну для кожного рекуператора в зимовий та літній періоди для різного складу палива, яке подається в регенеративні повітрянагрівачі. У розрахунках враховувалася зміна відносної вологості повітря на вході за напрямком руху повітря.

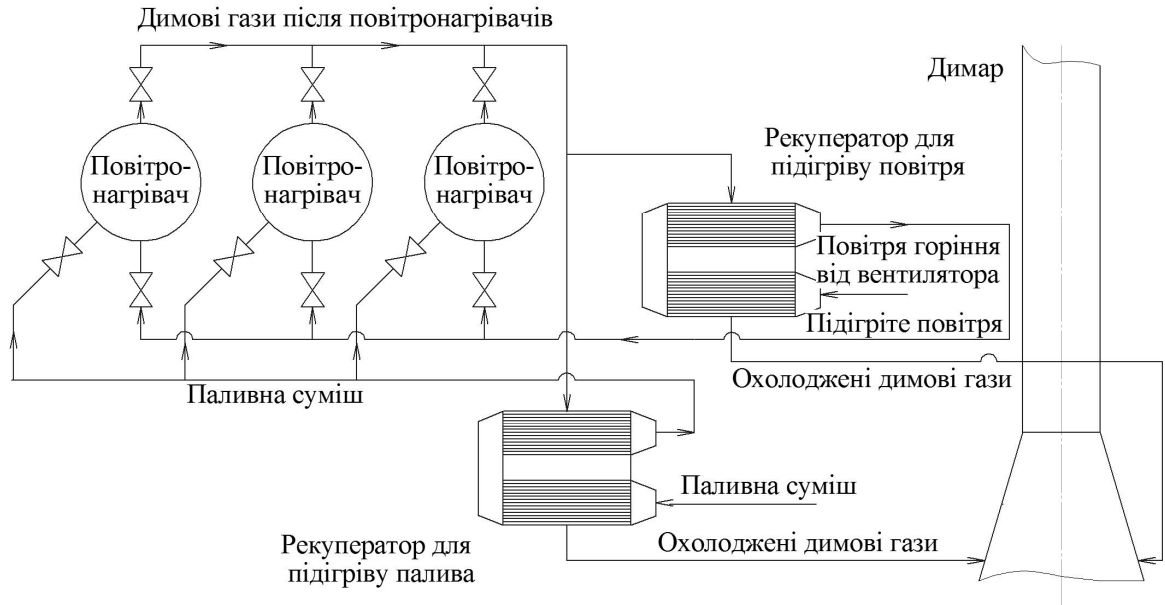


Рисунок 9 – Схема одночасного підігріву повітря і паливної суміші у окремих рекуператорах

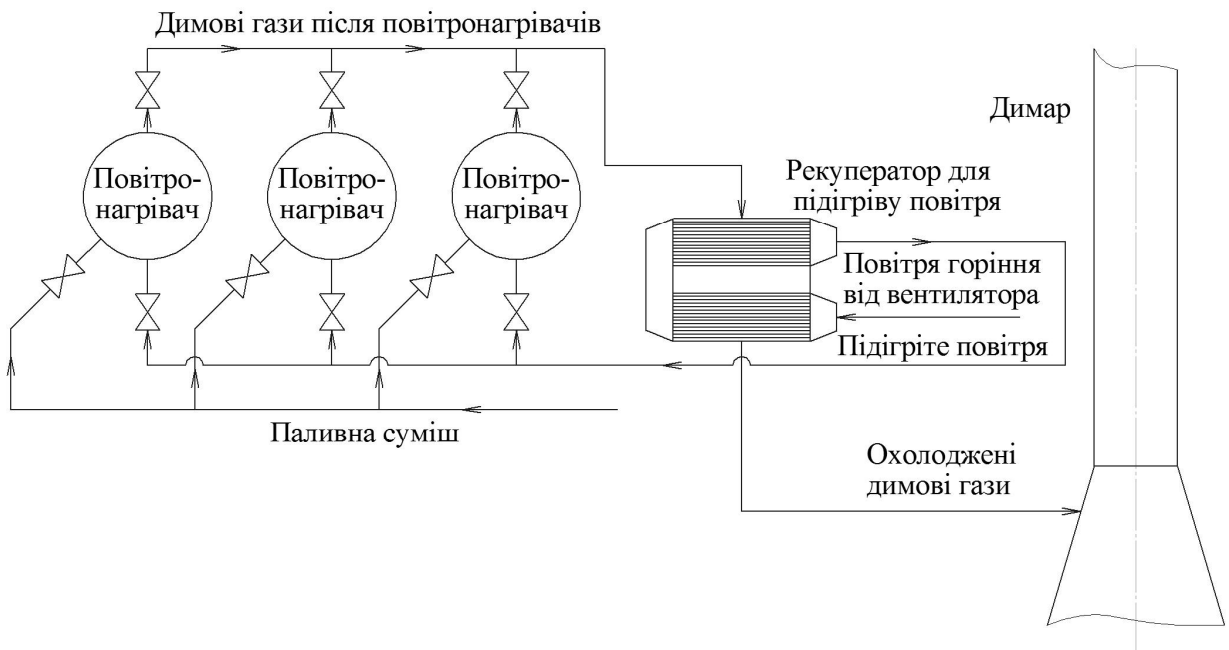


Рисунок 10 – Схема підігріву повітря горіння за допомогою одного рекуператора

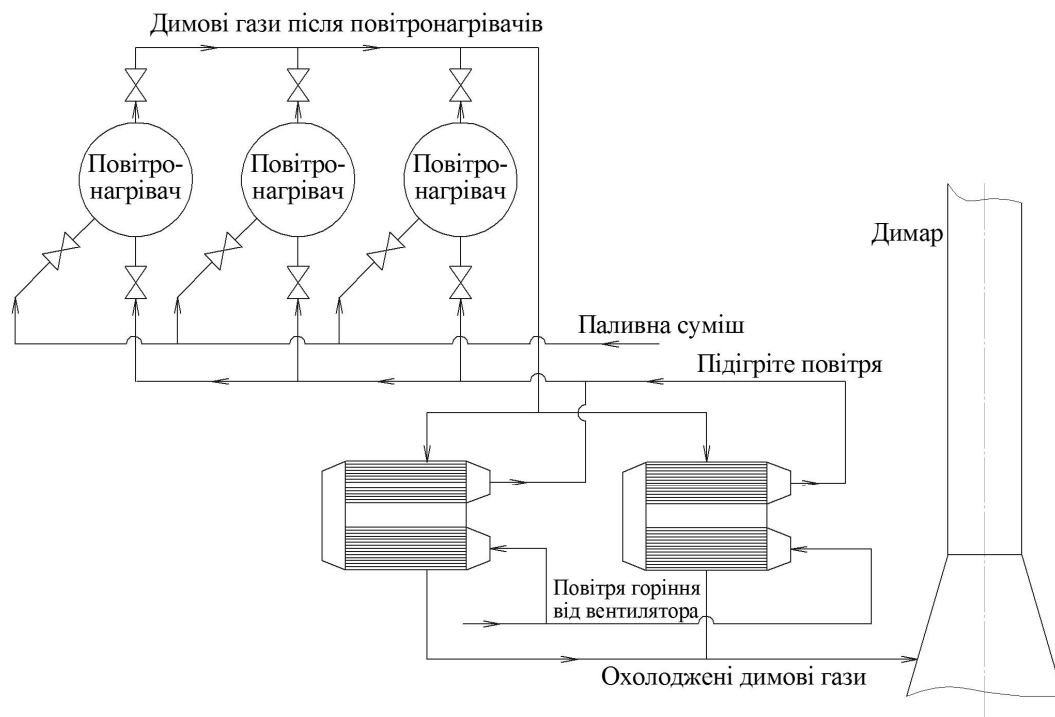


Рисунок 11 – Схема підігріву повітря у двох паралельно увімкнених за напрямком руху повітря рекуператорах

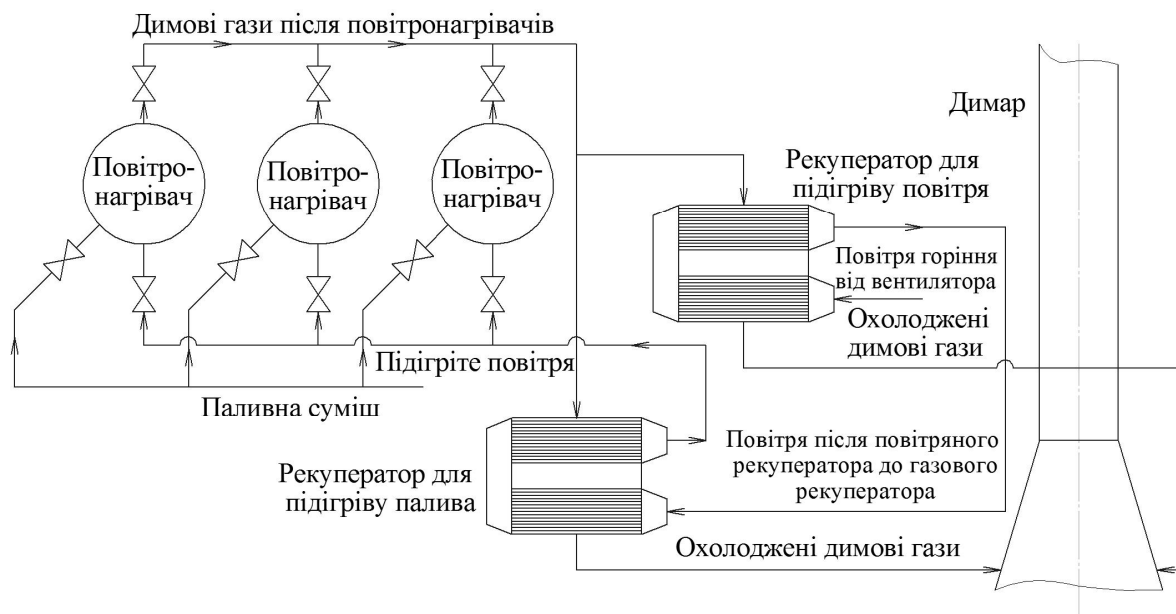


Рисунок 12 – Схема підігріву повітря у двох послідовно увімкнених за напрямком руху повітря рекуператорах

Діаграми демонструють розподіл за поверхнею теплообміну температур теплоносіїв та різниці між температурою насичення водяної пари та температурою стінки (приклад діаграм наведено на рис. 13), що дає можливість визначити місця випадіння вологи та можливої корозії поверхні при експлуатації на різних режимах та при різних умовах. Як видно з рис. 13,б при цих умовах роботи теплообмінника, у куті, де входить холодне повітря та виходять газы спостерігається від'ємне значення

різниці між температурою насичення водяної пари та температурою зовнішньої стінки, що вказує на випадіння вологи з газів у цьому місці та появу корозії стінок труб.

Температури повітря та палива на виході з теплообмінників було порівняно зі значеннями необхідних температур підігріву повітря горіння для забезпечення калориметричної температури під куполами повітрянагрівачів.

Серед схем систем утилізації, що розглядалися, найефективнішою виявилась схема з одночасним підігрівом повітря та палива. Вона дозволяє досягти найбільшої економії палива (7 %) та має найвищий коефіцієнт використання теплоти (КВТ) (0,49-0,51).

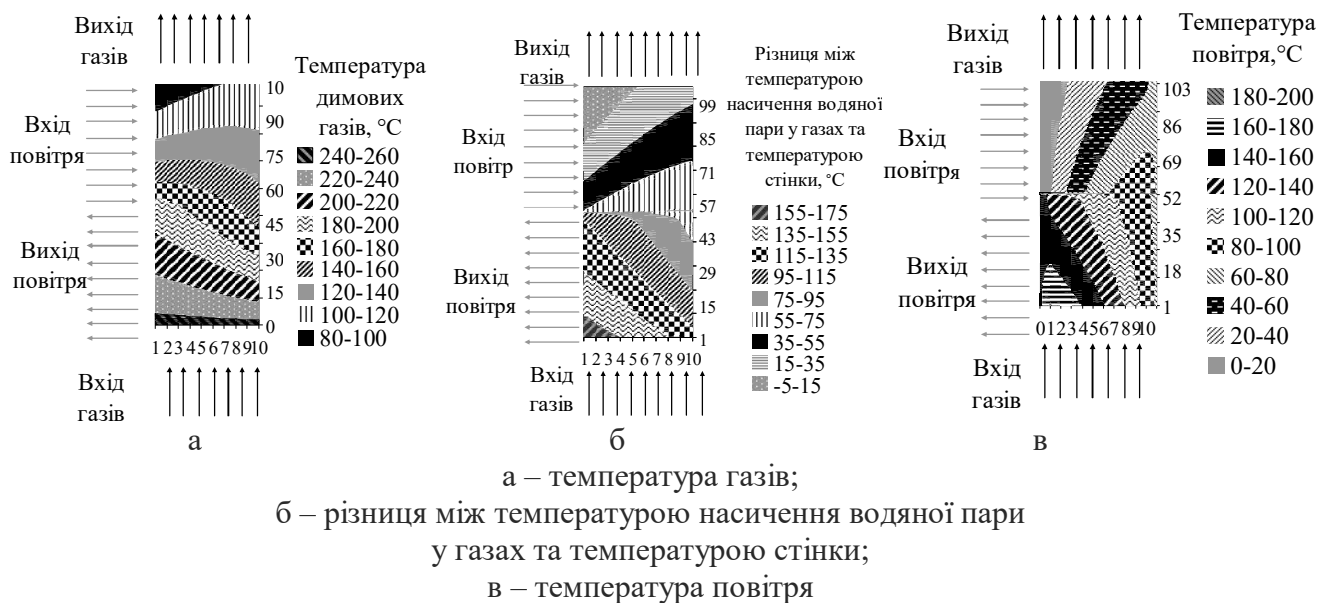


Рисунок 13 – Діаграми розподілу температур для першого за напрямком руху повітря підігрівача з рис. 12 (частка коксового газу 12 %, зимовий період)

Для підігріву тільки повітря розглянуто схеми з двома однаковими рекуператорами, які були застосовані у схемі підігріву повітря і палива, та схема з окремим великим рекуператором.

Найефективнішою виявилась схема з використанням одного окремого великого рекуператора, вона забезпечує найкращу утилізацію теплоти та має КВТ вищий (0,33-0,39) за КВТ інших систем (0,31-0,37, 0,32-0,38). Також встановлено, що за рахунок підігріву лише повітря частку коксового газу в паливі можна скоротити з 16 % до 11 %.

За результатами розрахунків і діаграмами розподілу температур виявлено, що в схемі з послідовним увімкненням однакових рекуператорів за напрямком руху повітря, різниця між температурою насичення водяної пари та температурою зовнішньої стінки в зимовий період для першого повітрянагрівача може досягати від'ємного значення, що свідчить про випадіння (конденсацію) вологи і, відповідно, утворення зон корозії та ненадійність роботи рекуператора.

Варіантні розрахунки компонування схем утилізації, що були виконані, показали універсальність розроблених методів і засобів, які дозволили визначити і спрогнозувати їх ефективність і надійність в експлуатації. Розроблені методи, алгоритми, програмні комплекси можна застосовувати і для інших систем утилізації з рекуперативними теплообмінниками, врахувавши специфіку їх компонування, конструкції і експлуатації. Результати такого аналізу є вихідними даними для розроблення варіантів модернізації або реконструкції систем утилізації.

Таким чином, показано, що застосування систем утилізації теплоти продуктів горіння доменних повітрянагрівачів з метою підігріву їх компонентів горіння є перспективним та ефективним енергозберігаючим заходом, що здатний зменшити собівартість чавуну шляхом економії високовартісного коксового газу.

У додатках наведено список публікацій здобувача за темою дисертації, відомості про апробацію та відомості щодо впровадження результатів дисертації.

ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні поставлено та вирішено актуальну задачу підвищення ефективності систем високотемпературного нагріву доменного дуття шляхом утилізації теплоти димових газів з метою підігріву компонентів горіння доменних повітрянагрівачів. У ході дослідження:

1. Було визначено режимні параметри димових газів блоку доменних повітрянагрівачів, що складається з трьох апаратів, які працюють в послідовному режимі. При цьому було опрацьовано вихідні дані (параметри системи високотемпературного нагріву дуття, склад палива): розраховано процес горіння палива для зимового та літнього періодів при різній частці коксового газу; визначено калориметричну температуру під куполами повітрянагрівачів, розраховано частку коксового газу, при додаванні якої забезпечується температура під куполом; отримано значення витрати і температури димових газів спочатку для одного повітрянагрівача, а потім у загальному газоході для блоку повітрянагрівачів для різного складу палива в літній та зимовий період. Встановлено, що температура димових газів для всіх випадків однакова, витрата димових газів змінна. Таким шляхом було отримано вихідні дані для розрахунку систем утилізації з боку димових газів.

2. Була встановлена взаємозалежність необхідних температур підігріву повітря горіння та частки коксового газу в паливі. З рівняння теплового балансу горіння палива розраховано необхідні температури підігріву компонентів горіння, при яких проектна температура під куполом повітрянагрівачів дотримується, а частка коксового газу може бути зменшена. Обрано перспективні варіанти співвідношення частки коксового газу в паливі та температур підігріву компонентів горіння, що були розглянуті при розрахунку схем систем утилізації.

3. Одержано функціональні залежності теплофізичних параметрів компонентів палива, димових газів та повітря, а також параметри палива і димових газів як сумішей для зручності при розрахунку зі застосуванням засобів ЕОМ. Для цього табличні дані було апроксимовано у вигляді рівнянь. Таким чином, розроблені методи та засоби розрахунку рекуператорів-утилізаторів є універсальними при використанні будь-якої суміші газів та повітря.

4. Покращено розрахунок систем утилізації шляхом застосування удосконаленої математичної моделі рекуператорів, методу їх розрахунку, за яких поверхня теплообміну поділялася на елементи, кожен з яких розраховувався P - NTU -методом, де враховувались особливості процесів гідродинаміки та теплообміну у кожному елементі. Реалізація моделі і розрахунки виконані у вигляді програмного продукту.

5. Розроблено та проаналізовано чотири схеми систем утилізації, що базуються на використанні рекуператорів: з одночасним підігрівом палива і повітря, з підігрівом повітря у одному окремому великому рекуператорі, з підігрівом повітря у двох рекуператорах, включених послідовно за напрямком руху повітря. Дві останні схеми є уніфікованими зі схемою одночасного підігріву повітря і палива.

6. Побудовано діаграми розподілу температур за поверхнею теплообміну для теплоносіїв та різниці температур між насиченням водяної пари у газах та стінки для рекуператорів, що задіяні в системах утилізації, що дозволило виявити місця можливого випадіння вологи та утворення корозії поверхні.

7. Проведено оцінку ефективності роботи систем утилізації. Встановлено, що можна скоротити споживання коксового газу з 16 % до 9 % (щорічна економія складе 72,8-74,2 млн. $\text{м}^3/\text{рік}$), КВТ найбільш ефективної системи утилізації (з одночасним підігрівом повітря та палива) складає 0,49-0,51. Виявлено «вузькі» місця – тенденцію до виникнення зон корозії у цій схемі та в схемі з послідовним увімкненням рекуператорів за напрямком руху повітря.

Отже, розроблено і застосовано уточнену математичну модель, методи та засоби для розрахунку і аналізу складних теплообмінних апаратів систем утилізації теплоти димових газів системи доменного дуття, які дають можливість визначити працездатність апаратів для різних схем систем утилізації на різних режимах з урахуванням факторів експлуатації. Уточнені методи і засоби розрахунку та аналізу теплообмінників-утилізаторів дозволяють підвищити їх ресурс та надійність, скоротити витрати паливно-енергетичних ресурсів, собівартість енергоносіїв, зменшити негативний вплив високотемпературних енерготехнологічних процесів на навколишнє середовище.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА ІНДЕКСИ

$d_{\text{СЕР}}, d_{\text{ВН}}, d_{\text{ЗОВН}}$ – середній, внутрішній та зовнішній діаметри трубки, м;

E – індекс, який вказує на те, що параметр визначається в елементі;

$k_{\text{Г}} \cdot p \cdot s$ – сумарна оптична товщина теплоносія (критерій Бугера);

Nu – число Нуссельта;

R_3 – термічний опір забруднень з обох сторін стінки (накипу, сажі, тощо), $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$;

$T_{\text{Г}}$ – температура відповідного теплоносія при розрахунку коефіцієнта тепловіддачі випромінюванням, К;

$T_{\text{ст}}$ – температура стінки при розрахунку коефіцієнта тепловіддачі випромінюванням, К;

$t_{\text{ГАЗ1}}^E, t_{\text{ХОЛ1}}^E$ – температура на вході в елемент теплоносія, що гріє, та теплоносія, що нагрівається, відповідно, $^\circ\text{C}$;

$t_{ГАЗ2}^E$, $t_{ХОЛ2}^E$ – температура на виході з елементу теплоносія, що гріє, та теплоносія, що нагрівається, відповідно, °С;

$W_{ХОЛ}^E$ – водяний еквівалент теплоносія, що нагрівається, Дж/(с·°С);

$W_{ГАЗ}^E$ – водяний еквівалент теплоносія, що гріє, Дж/(с·°С);

ε_3 – ступінь чорноти забруднених стінок;

$\varepsilon_Г$ – ступінь чорноти потоку газів;

λ – коефіцієнт теплопровідності теплоносія, Вт/(м·°С);

$\lambda_{СТ}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м·°С);

ρ – густина, кг/м³;

ω – швидкість, м/с.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

За темою дисертації Заєць О. М. опубліковано 11 наукових праць: з них 6 – у наукових періодичних фахових виданнях України, з яких 3 – у наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 5 – у матеріалах та тезах конференцій.

1. Заєць, О. М., Кошельник, О. В., Кошельник, В. М. (2012). Особливості визначення витрати та температури продуктів згоряння у димовому тракті доменних повітрянагрівачів. *Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць*, Харків: НТУ «ХПІ», 50, 133-139.

2. Заєць, О. М., Кошельник, О. В., Кошельник, В. М. (2013). Прогнозування режимних параметрів теплоносіїв регенеративних доменних повітрянагрівачів для розрахунків теплоутилізатора димових газів. *Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, Харків: НТУ «ХПІ», 13 (987), 116-124.

3. Заец, Е. Н., Ганжа, А. Н., Подкопай, В. Н., Марченко, Н. А. (2016). Анализ эффективности теплообменников-утилизаторов теплоты энерготехнологических комплексов и агрегатов. *Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, Харків: НТУ «ХПІ», 10 (1182), 56-60, doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.08.

4. Заєць, О. М., Ганжа, А. М., Кошельник, О. В., Павлова, В. Г., Хавін, Є. В. (2016). Розробка перспективних систем утилізації теплових вторинних енергоресурсів доменного виробництва. *Інтегровані технології та енергозбереження*, Харків: НТУ «ХПІ», 2, 10-17.

5. Заєць, О. М. (2016). Вплив частки коксового газу в паливі на необхідний рівень підігріву повітря горіння доменних повітрянагрівачів при використанні їх теплоти димових газів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*, Харків: НТУ «ХПІ», 42 (1214), 43-48, doi:10.20998/2413-4295.2016.42.07.

6. Zaiets, O., Ganzha, A., Koshelnik, A. (2017). Analysis of Efficiency and Reliability of Blast-furnace Process Waste Heat Recovery Systems. *Technology Audit and Production Reserves*, 1/1(33), 49-54, doi: 10.15587/2312-8372.2017.92912.

7. Вусик (Заєць) О. М., Кошельник, В. М. (2012). Розрахунок динамічних характеристик продуктів згоряння у димовому тракті доменних повітрянагрівачів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XX міжнародної наук.-практ. конф., 15-17 травня: тези доп., Ч. I*, Харків: НТУ «ХП», 246.

8. Заєць, О. М., Кошельник, О. В., Кошельник, В. М. (2013). Прогнозування теплових режимів доменних регенеративних повітрянагрівачів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XXI міжнародної наук.-практ. конф., 29-31 травня: тези доп., Ч. I*, Харків: НТУ «ХП», 292.

9. Заец, Е. Н., Ганжа, А. Н., Подкопай, В. Н., Марченко, Н. А., Куцова, Д. В. (2016). Методика расчета теплообменника-утилизатора теплоты энерготехнологических комплексов и агрегатов. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XXIV міжнародної наук.-практ. конф., 18-20 травня: тези доп., Ч. I*, Харків: НТУ «ХП», 249.

10. Заєць, О. М., Ганжа, А. М. (2016). Моделювання процесів у трубчатому утилізаторі теплоти газів, що відходять з доменного виробництва. *Актуальні проблеми енергетики та екології: матеріали XVI всеукраїнської наук.-техн. конф., 5-7 жовтня: тези доп.*, Херсон: ФОП Грінь Д., 22-24.

11. Заєць, О. М., Ганжа А. М. (2017). Оцінка ефективності системи утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XXV міжнародної наук.-практ. конф., 17-19 травня: тези доп. Ч. I*, Харків: НТУ «ХП», 249.

Наведені публікації містять результати безпосередньої роботи здобувача на окремих етапах дослідження, повною мірою відображають основні положення та висновки роботи. Авторська участь здобувача в опублікованих наукових працях погоджена зі співавторами.

АНОТАЦІЯ

Заєць О. М. Підвищення ефективності систем високотемпературного нагріву дуттєвого повітря на основі утилізації теплоти продуктів горіння. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». – Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, Харків, 2017.

В роботі розглянуто систему високотемпературного нагріву дуттєвого повітря, що складається з трьох доменних повітрянагрівачів, в яких спалюється доменний газ, збагачений коксовим. Для цієї системи було визначено склад та температуру димових газів, їх витрату, та витрату компонентів згоряння, а також необхідні температури підігріву повітря (повітря та палива), у літній та зимовий періоди. З метою економії коксового газу було розглянуто чотири схеми системи утилізації теплоти димових газів, що базуються на використанні гладкотрубних рекуператорів.

Запропоновано удосконалену математичну модель та метод розрахунку складних рекуперативних теплообмінників зі змішаним рухом потоків теплоносіїв, який ґрунтується на поділі поверхні теплообміну на базові мікротеплообмінники, де використовується P - NTU -метод розрахунку, і який вперше було застосовано для утилізаторів теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів. На основі результатів розрахунків проведено порівняльний аналіз схем утилізації, підраховано обсяги економії коксового газу, побудовано діаграми розподілу температур теплоносіїв та різниці між температурою насичення водяної пари та температурою стінки для кожного рекуператора-утилізатора, що можуть бути використані для визначення областей можливого випадіння конденсату та утворення зон корозії.

Ключові слова: доменні повітрянагрівачі, продукти згоряння, димові гази, утилізація теплоти, рекуператор, тепломасообмінне обладнання, теплофізичні властивості, енергозбереження.

АННОТАЦИЯ

Заец Е. Н. Повышение эффективности систем высокотемпературного нагрева дутьевого воздуха на основе утилизации теплоты продуктов горения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 «Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика». – Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, 2017.

Диссертационная работа посвящена актуальной задаче – повышению эффективности систем высокотемпературного нагрева дутьевого воздуха на основе утилизации теплоты продуктов горения. В работе рассмотрена система высокотемпературного нагрева дутьевого воздуха, состоящая из трех доменных воздухонагревателей, в которых сжигается доменный газ, обогащенный коксовым. Для одного доменного воздухонагревателя после его расчета были получены значения режимных параметров, а именно расход и температура, дымовых газов. Для системы из трех аппаратов был определен состав и температура дымовых газов, их расход, и расход компонентов сгорания, а также необходимые температуры подогрева воздуха (воздуха и топлива), в летний и зимний периоды, обеспечивающие одновременно проектную температуру под куполами доменных воздухонагревателей и снижение доли коксового газа в топливе.

С целью экономии коксового газа были рассмотрены четыре схемы системы утилизации теплоты дымовых газов, основанные на использовании гладкотрубных рекуператоров, три из них являются унифицированными. Системы рассматривались в зимний и летний периоды с учетом состава топлива (доля коксового газа варьировалась в пределах 7-9 % для системы одновременного подогрева воздуха и топлива, и 10-12 % – для систем подогрева лишь воздуха).

В диссертации разработано усовершенствованную математическую модель, метод расчета сложных рекуперативных теплообменников со смешанным течением теплоносителей, который основывается на разбиении поверхности теплообмена на базовые микротеплообменники, в каждом из которых учитываются теплофизические свойства теплоносителей, зависящие от температуры и давления.

Микротеплообменники рассчитываются Р-NTU-методом. Такой метод впервые был применен для утилизаторов теплоты дымовых газов доменных воздухонагревателей. На основе результатов расчетов проведен сравнительный анализ схем утилизации, подсчитано объемы экономии коксового газа, построены диаграммы распределения температур теплоносителей и разницы между температурой насыщения водяного пара и температурой стенки для каждого рекуператора-утилизатора, которые могут быть использованы для определения областей возможного выпадения конденсата и образования зон коррозии. Также представлена методика гидравлического расчета рекуператоров.

Поскольку реализация модели выполнялась в виде программного продукта, теплофизические свойства компонентов дымовых газов, топлива и воздуха были аппроксимированы и представлены в виде функциональных зависимостей, это дает возможность применять расчетный комплекс для разнообразных теплоносителей.

Ключевые слова: доменные воздухонагреватели, продукты сгорания, дымовые газы, утилизация теплоты, рекуператор, тепломассообменное оборудование, теплофизические свойства, энергосбережение.

ANNOTATION

Zaiets O. M. Hot blast generating systems efficiency improvement via waste gases heat recovery. – As manuscript.

Thesis for the scientific degree of the Candidate of Technical Sciences by specialty 05.14.06 – Technical Thermal Physics and Industrial Heat-Power Engineering – A. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2017.

The thesis deals with the hot blast generating system consisted of three hot blast stoves, where the blast furnace gas enriched with coke oven gas is burned. The composition and temperature of flue gases, their rate, and the rate of combustion components, the required temperatures for air (air and fuel) preheating in the summer and winter periods were determined. In order to save the coke oven gas, four schemes of flue gas utilization systems were considered. The systems are based on using of bare-tube heat exchangers.

The advanced mathematical model and the method of calculation of complex recuperative heat exchangers with the cross-countercurrent scheme of heat mediums movement, which is based on the heat exchanger surface partition on the base micro-heat exchangers, where the P-NTU method of calculation is used, was proposed and used at the first time for heat utilizers of hot blast stoves flue gases. Based on the results of calculations, a comparative analysis of utilization schemes was carried out, coke gas savings were calculated. Diagrams, which show the distribution over the heat transfer area of mediums temperature and difference between vapour saturation temperature and temperature of the wall, were built. The diagrams can be used for detection of possible zones of condensate formation and initiation of corrosion.

Keywords: hot blast stoves, combustion gases, waste gases, heat recovery, recuperative heat exchanger, heat-mass exchange equipment, thermophysical properties, energy conservation.

Підписано до друку 06.01.2018 р. Формат 60х90 1/16.
Папір офсетн. Друк – різнографія. Ум. друк. арк. 0,9
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Зам. №06–01/18

«ФОП Напольська А.В.»
Виписка з ЄДР ЮО та ФОП № 24800000000152491
від 01.10.2013 р.
м. Харків вул. Я. Мудрого (був.Петровського), 34
т.: 700-42-81