

УДК 662.995

## Підвищення ефективності технологічної схеми промислового високотемпературного повітрянагрівача

А. С. Макаров<sup>1</sup>, М. П. Сенчук<sup>2</sup>, А. І. Ходос<sup>3</sup>, М. О. Кирієнко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., ст. наук. співр., ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод», м. Калинівка, Україна, [makarov.anatoly@kmbp.com.ua](mailto:makarov.anatoly@kmbp.com.ua).

<sup>2</sup>к.т.н., доц., Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, [smp\\_21@ukr.net](mailto:smp_21@ukr.net).  
ORCID: 0000-0001-8968-7336

<sup>3</sup>голова наглядової ради ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод», м. Калинівка, Україна, [khodos@kmbp.com.ua](mailto:khodos@kmbp.com.ua)

<sup>4</sup>заступник директора ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод», м. Калинівка, Україна, [mihail\\_kirienko@ukr.net](mailto:mihail_kirienko@ukr.net)

**Анотація.** Проаналізовано дві типові схеми нагрівання повітря у газозагнаних повітрянагрівачах (теплогенераторах), конструктивна відмінність яких полягає у різному взаємному розташуванні жарової труби-камери згоряння та конвективної поверхні нагрівання (димогарних труб). Описано вдосконалену конструктивну схему розробленого високотемпературного повітрянагрівача-теплогенератора з нагріванням повітря для технологічних процесів сушіння. Відмічено основні технічні та експлуатаційні переваги прийнятої схеми нагрівання повітря, яка вирізняється високою економічністю й надійністю. Розглянуто нові технічні рішення в розробленій конструкції теплогенератора ТГ, що спрямовані на підвищення його ефективності та надійності за тривалої експлуатації. Прийняття запропонованих рішень обґрунтовано на підставі лабораторних та розрахункових досліджень. Наведено схему вогневого стенду задля вивчення процесу відводу теплоти від теплонапружених поверхонь нагріву шляхом радіаційно-конвективної теплопередачі із застосуванням теплопоглинаючих екранів. Описано сконструйовані системи охолодження жарових труб теплогенераторів на підставі стенових досліджень та розробленої відповідної розрахункової моделі. Наведено розрахункові залежності зміни температури металу нагрітих стінок від швидкості повітряного потоку в одинарному каналі та від ширини подвійного повітряного каналу з теплопоглинаючим екраном. Показано результати розрахункових досліджень з метою оптимізації конвективної поверхні нагріву і вхідних ділянок димогарних труб як залежності зміни довжини конвективних пакетів залежно від швидкості димових газів та температури газів, металу стінок і повітря на початковій ділянці димогарних труб при різних варіантах її конфігурації. Реалізовано запатентовані технічні рішення в конструкціях промислово впроваджених високотемпературних повітрянагрівачів – газових теплогенераторів ТГ-0,95-200, ТГ-1,9-200 і ТГ-2,4-200 з температурою нагріву повітря 200 °С. Підтверджено їхню високу економічність і надійність протягом багаторічної експлуатації в складі сушильних установок на підприємствах харчової промисловості України, Білорусії, Російської Федерації, Азербайджану, Узбекистану, Туркменістану, Киргизстану, Польщі.

**Ключові слова:** високотемпературний повітрянагрівач, теплогенератор, схема нагріву повітря, технологічний процес сушіння, нагріте повітря

**Вступ.** Повітрянагрівачі широко застосовуються в системах повітряного опалення будівель і споруд різного призначення, для підігрівання повітря (дугтя) перед подачею його в теплові установки, доменні печі тощо, в технологічних процесах сушіння продуктів та матеріалів у різних галузях промисловості (харчовій, целюлозно-паперовій, деревообробній). Підігрів теплоносія для систем повітряного опалення здійснюється здебільшого в водяних, парових або електричних повітрянагрівачах, які розповсюджені на вітчизняному ринку. Також відомі повітрянагрівачі з використанням продуктів згоряння для нагрівання повітря до 100 °С.

У технологічних процесах здебільшого використовують високотемпературний теплоносіє з температурою вище 100 °С, підігрів якого переважно здійснюють у газових чи рідкопаливних підігрівачах (теплогенераторах). За необхідності подачі чистого підігрітого повітря (для сушіння продуктів у харчовій промисловості

тощо) застосовують рекуперативні повітрянагрівачі. Наряду з перевагами таких підігрівачів у передачі теплоти теплоносієм, їхні конструктивні елементи нагріваються нерівномірно. Виникає перевищення допустимої температури металу високонапружених елементів конструкції при нагріві повітря до високої температури. Це негативно впливає на надійність їхньої тривалої експлуатації. Підтримання безпечної тривалої роботи високотемпературного теплогенератора є важливим завданням у досягненні ефективності та експлуатаційної надійності технологічного процесу.

**Актуальність дослідження** – підвищення ефективності високотемпературного підігрівання повітря для технологічних процесів із забезпеченням економічності та надійності конструкцій вогневих теплогенераторів протягом тривалої експлуатації.

**Останні дослідження та публікації.** Ринок України досить насичений опалювальними те-

плогенераторами з ефективним підігріванням повітря до 65...100 °С. Більшість відомих вогневих повітрянагрівачів (теплогенераторів) за схемами нагрівання повітря можна віднести до двох типів:

- I – з димогарними каналами розташованими навколо жарової труби – камери згоряння [21] (рис. 1);
- II – з окремо розташованими жаровою трубою і пакетом димогарних труб.

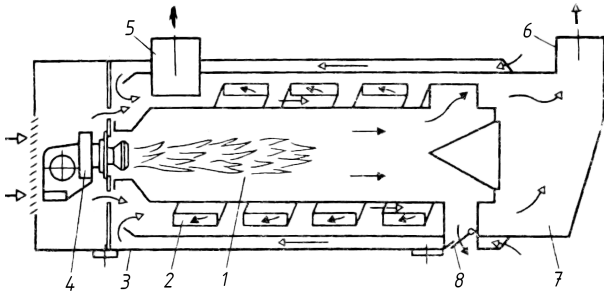


Рис. 1. Схема повітрянагрівача типу I:

- 1 – жарова труба – камера згоряння;
- 2 – теплообмінник; 3 – корпус; 4 – палик;
- 5 – вихід димових газів; 6 – вихід нагрітого повітря;
- 7 – повітряна камера; 8 – вибуховий клапан

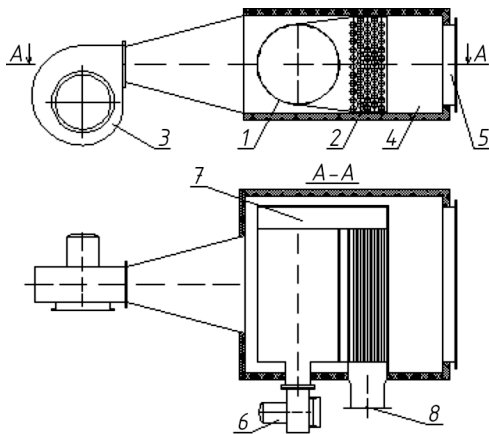


Рис. 2. Схема повітрянагрівача типу II.

Розміщення газомазутного повітрянагрівача:

- 1 – жарова труба; 2 – конвективний пакет; 3 – вентилятор;
- 4 – повітряна камера; 5 – вихід нагрітого повітря;
- 6 – палик; 7 – поворотна газова камера;
- 8 – вихід димових газів

Опалювальні теплогенератори (газомазутні повітрянагрівачі) за типом II переважно розміщують у повітряному тракті припливної установки або центрального кондиціонера (рис. 2). Конструкція такого повітрянагрівача складається з циліндричної камери згоряння (жарової труби) і пакету димогарних труб, об'єднаних у єдиний блок за допомогою фланців. Потік повітря в поперечному напрямку омиває жарову трубу і пучок димогарних труб. Температура металу, як правило, не перевищує 500 °С завдяки низьким тепловим навантаженням і невисокому підігріву повітря.

Теплогенератори з підігрівом повітря для

технологічних потреб виконуються переважно типу I з корпусом циліндричної форми. У ньому димогарні труби розташовуються концентрично навколо жарової труби. Омивання повітрям поверхонь нагріву передбачено поздовжнє (рис.3).

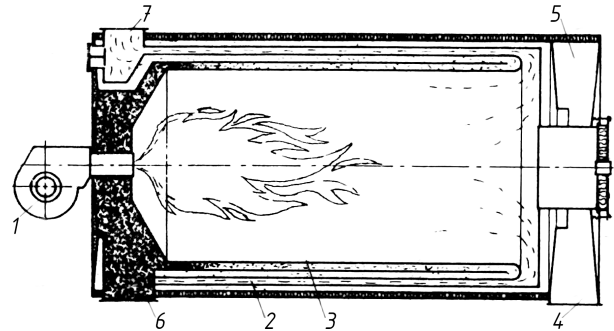


Рис.3. Схема повітрянагрівача для технологічних потреб (тип I):

- 1 – палик; 2 – конвективний пакет; 3 – жарова труба;
- 4 – вхід холодного повітря; 5 – повітряна камера;
- 6 – вихід димових газів; 7 – вихід нагрітого повітря

Нагрівачі цього типу працюють у діапазоні температури 175-250 °С з ККД близько 85 % [3]. Для підвищення економічності ці теплогенератори додатково комплектуються системою утилізації теплоти відвідних газів. Система утилізації [15] складається з двох теплообмінників з оребреними трубами:

- продукти згоряння – проміжний теплоносії;
- проміжний теплоносії – вхідне повітря.

Циркуляція теплоносія насосна.

Для розроблення високотемпературного повітрянагрівача для технологічних процесів з підвищеними економічними показниками, тобто з високим ККД, прийнято схему за типом II. Вона дозволяє за збереження компактності конструкції нарощувати потрібну поверхню нагрівання. При цьому з урахуванням потрібного для технологічних процесів підвищення температури нагрітого повітря вище 100 °С необхідна відпрацьована ефективна система охолодження теплонапружених вузлів жарової труби. Вона повинна запобігати перегріву металу вище допустимої температури.

Проблемі підвищення надійності теплонапружених елементів конструкцій повітрянагрівачів при високій температурі нагріву повітря, камер згоряння газових турбін, їх експлуатаційним характеристикам присвячено багато теоретичних і експериментальних робіт [2, 4, 5, 9-13,16-20].

**Метою роботи** є обґрунтування прийнятих технічних рішень у розробленій конструкції високотемпературного повітрянагрівача з метою підвищення економічності та надійності його

роботи з рекуперативним нагріванням повітря вище 100 °С порівняно з відомими зразками.

**Схема запропонованого теплогенератора.** Повітрянагрівачі з нагріванням повітря для технологічних процесів характеризуються високою потужністю, значними кількостями повітря та великими габаритами. Нагрівання повітря в таких конструкціях до високої температури (близько 200 °С) потребує відповідно до вимог технологічних процесів додаткових заходів щодо забезпечення ефективності та надійності роботи повітрянагрівача протягом тривалого періоду експлуатації.

У роботі розглянуто нові технічні рішення конструктивної схеми високотемпературних повітрянагрівачів (другого типу теплогенераторів), які забезпечують підвищення економічності роботи та надійності конструкції протягом тривалої експлуатації. Такі рішення прийняті на підставі розрахункових і експериментальних досліджень та за результатами балансових і експлуатаційних випробувань і реалізовані в удосконаленій конструктивній схемі повітрянагрівача-теплогенератора ТГ [14] (рис. 4).

Порівняно з наведеними вище схемами повітрянагрівачів теплогенератор ТГ має такі переваги:

- глибоке охолодження димових газів і висока економічність;
- захист від конденсації за рахунок попереднього підігріву повітря в поворотній камері;
- висока температура нагрітого повітря завдяки остаточному його нагріву від топкової камери і вирішенні при цьому інтенсивного охолодження стінок топкової камери;
- підвищена надійність конструкції завдяки:
  - зниженню температури металу стінок поверхонь нагрівання жарової труби та поворотної камери, виготовлених із жаростійких сталей, нижче допустимої температури для довготривалої експлуатації цих сталей;
  - створення відокремленого трубного пучка на вході високотемпературних газів в димогарні труби першого конвективного пучка;
  - оригінальних вузлів компенсації теплових подовжень конструктивних елементів.

Підвищення економічності роботи повітрянагрівача досягається глибоким охолодженням димових газів повітрям з невисокою температурою та завдяки організації нагрівання

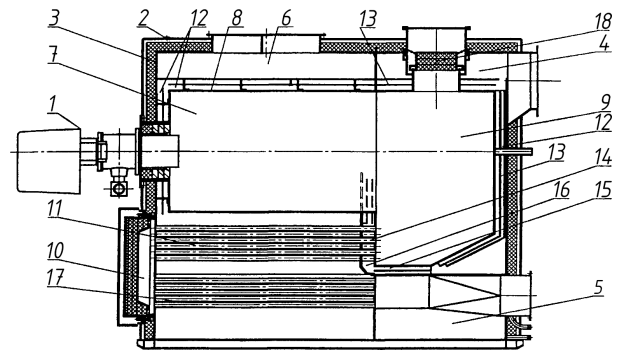


Рис. 4. Схема високотемпературного повітрянагрівача - теплогенератора ТГ:

1 – пальник; 2 – декоративний кожух; 3 – корпус повітряний; 4 – вхідна, 5 – поворотна, 6 – вихідна; 7 – газохід; 8 – жарова труба; 9 – перший поворотний газохід; 10 – другий поворотний газохід; 11 – перший пучок конвективного пакету; 12 – повітряні канали; 13 – проміжні екрани; 14 – відокремлений пучок димогарних труб; 15, 16 – повітряні канали відокремленого пучка; 17 – другий пучок конвективного пакету; 18 – вибуховий клапан (вентилятор подачі повітря у вхідну повітряну камеру не показано)

повітря за зустрічною схемою руху повітря і газів. Їх подають, відповідно, вентилятором та пальником з виходом нагрітого до високої температури повітря над жаровою трубою.

Основний холодний повітряний потік з вхідної повітряної камери 4 проходить в повітряні канали 12 першого поворотного газоходу 9. Далі цей потік проходить поворотну повітряну камеру 5, у якій омиває стінки каналу виходу димових газів, та по черзі між трубами другого пучка 16 і першого 11 пучків димогарних труб конвективного пакету. Виходить повітря до повітряних каналів 12 жарової труби 8 і до вихідної повітряної камери 6. Пучки димогарних труб омиваються повітрям з зовнішнього боку за поперечною схемою. Продукти згоряння з камери згоряння – газоходу 7 – надходять спочатку в перший поворотний газохід 9, далі в перший пучок 11 димогарних труб конвективного пакету, другий поворотний газохід 10, другий пучок 17 димогарних труб і у вихідний канал димових газів.

**Радіаційно-конвективне охолодження високонапружених поверхонь нагріву.** Надійність тривалої експлуатації теплогенератора суттєво залежить від температур металу високонапружених елементів конструкції, рівень яких визначається системою охолодження поверхонь нагрівання повітряним потоком.

З метою визначення характеру процесів передачі теплоти при повітряному охолодженні теплонапружених високотемпературних поверхонь були проведені [12] спеціальні дослідження на моделях стінки жарової труби. Серйозною про-

блемою таких досліджень є створення в лабораторній установці теплових потоків до  $70 \text{ кВт/м}^2$ , характерних для жарових труб. Для цього було вибрано метод нагріву стінки полум'ям газового пальника, ефективність якого підтверджено в роботі [1]. Дослідження тепловіддачі факела до поверхні показали, що факел полум'я суміші повітря-метан за схемою на рис. 5 створює теплові потоки понад  $100 \text{ кВт/м}^2$ .

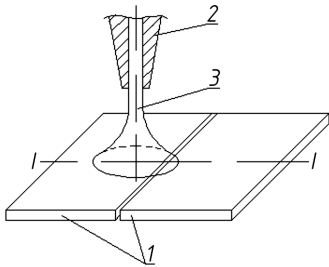


Рис. 5. Схема обтікання плоского зонда факелом полум'я:  
1 – пластини; 2 – пальник газовий; 3 – факел;  
I-I – лінія переміщення осі факелу

Стенд для дослідження високо-температурних режимів теплонапружених елементів конструкції теплогенератора є аеродинамічною трубою відкритого типу (рис. 6).

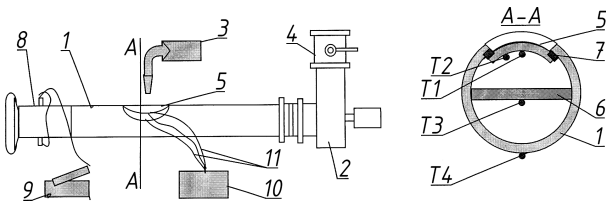


Рис. 6. Схема стенду для вивчення температурного режиму на моделях стінки жарової труби теплогенератора:

- 1 - корпус; 2 – вентилятор; 3 – пальник газовий;
- 4 – шибер; 5 – модель елемента стінки; 6 – екран;
- 7 – ізоляція; 8 – сопло вимірювальне; 9 – мікроманометр;
- 10 – вольтметр; 11 – термопари; T1...T4 – точки приєднання термопар

Модель теплонапруженої стінки теплогенератора – сталевая пластинка діаметром 70 мм, спрофільована вздовж твірної труби і притиснута до відповідного отвору в трубі через теплоізоляційну прокладку. Пластинка нагрівається полум'ям зварювального газового пальника при максимальній витраті газу. Цей пальник розташований на відстані 70 мм від сопла до поверхні нагрівання. З метою вивчення променистого поглинання теплоти від пластинки навпроти її вздовж осі проточної частини встановлено сталевий екран, який також омивається холодним повітрям.

З урахуванням результатів дослідів на

моделях стінки в діапазоні швидкості повітря від 0 до 20 м/с (рис. 7) розроблено розрахункову модель теплопередачі в повітряних каналах теплогенератора, які огорожують теплонапружені поверхні нагрівання з метою їх охолодження.

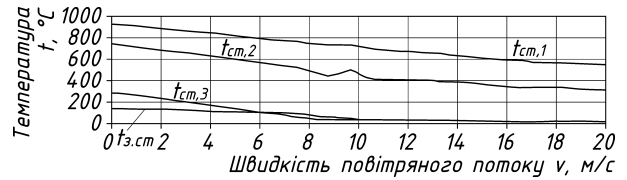


Рис. 7. Зміна температури металу нагрітої стінки від швидкості повітряного потоку (результати вимірювань).

На відміну від [6,16] у моделі, яка враховує стінку жарової труби, проміжний теплопоглинальний екран і зовнішній повітряний короб, розраховується сумісний вплив процесів променистого теплообміну й конвекції на температуру металу жарової труби. Розрахунковий аналіз схем перенесення теплоти шляхом випромінювання та конвекції виконано на розробленій комп'ютерній моделі за таких умов:

- величину теплового потоку для зразка теплогенератора прийнято  $50 \text{ кВт/м}^2$  (максимальна температура металу жарової труби  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- витрата повітря в каналах постійна;
- швидкість повітряного потоку в каналах обернено пропорційна ширині повітряних каналів.

Розглянуто дві системи передачі теплоти (охолодження) жарової труби:

- плоскопаралельних тіл, розділених повітряним потоком;
- плоскопаралельних тіл з перегородкою – екраном між ними в повітряному потоці (рис. 8).

Як видно з графіків, при недостатньо ефективному охолодженні поверхонь нагрівання температура металу може перевищувати допустимий рівень для найбільш жаростійких сталей.

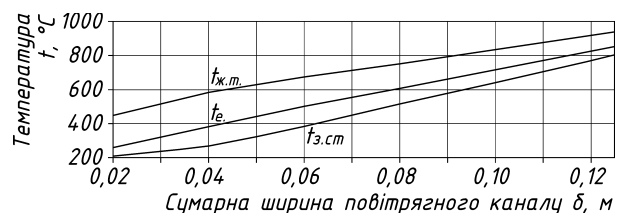


Рис. 8. Залежність температури металу стінки від ширини подвійного повітряного каналу для схеми „жарова труба – екран – зовнішня стінка повітряного каналу”

Надійність конструкції забезпечується за рахунок зниження температури металу стінок поверхонь нагрівання жарової труби та поворотної камери, виготовлених із жаростійких сталей, нижче допустимої температури для довготривалої експлуатації цих сталей. Це досягається завдяки тому, що названі поверхні нагрівання оточені каналами з високою швидкістю руху повітря, а в каналах встановлено проміжні теплопоглинальні екрани [13]. На поверхні жарової труби з повітряного боку розміщено турбулізатори [7].

У каналах, які складаються з внутрішніх поверхонь (радіаційні поверхні) і огорожувальних зовнішніх поверхонь, при температурі радіаційної поверхні понад  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  значна кількість теплоти передається випромінюванням на огорожувальні поверхні. Ці поверхні нагріваються до більш високої температури ніж температура повітря і передають теплоту до навколишнього середовища.

Наявність у каналі спеціально обробленого проміжного теплопоглинального екрану [23], який омивається повітрям з двох боків і має понижену температуру, сприяє зниженню температури радіаційних поверхонь. За результатами розрахунків, які підтверджені випробуваннями натурних зразків, найбільш ефективним для охолодження є подвійний канал, оптимальна сумарна ширина каналів якого становить 40 мм, а швидкість повітря в них досягає 21 м/с.

**Конвективна поверхня.** Економічність теплогенератора, тобто глибина охолодження продуктів згоряння, визначається ефективністю конвективної поверхні нагріву (пакету димогарних труб).

У конструкції застосовуються димогарні труби з утвореними шляхом локального обтискування внутрішніх кільцевих виступів – турбулізаторів. Тепловіддача димові газу-стінка труби для таких поверхонь залежно від геометричних параметрів турбулізаторів зростає в 2-3 рази [8].

Необхідна глибина охолодження газів (з  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ , коефіцієнт корисної дії 93 %) забезпечується за рахунок довжини шляху газів у димогарних трубах. За швидкості димових газів 10 м/с довжина труб повинна становити 4,4 м.

Відповідність конструктивної довжини теплогенератора і необхідної довжини шляху газів узгоджується за рахунок організації декількох ходів газів у пакеті та підбору діаметра димогарних труб з потрібною інтенсивністю турбулізації газового потоку [11] (рис. 9),

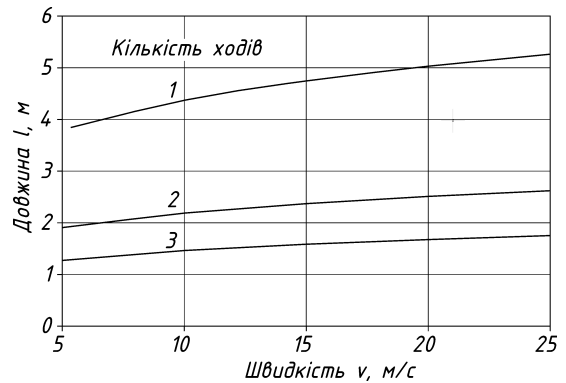


Рис. 9. Довжина конвективного пакета (одно-, дво-, триходового залежно від швидкості димових газів (діаметр димогарних труб  $45 \times 1,5$  з кільцевими турбулізаторами з параметром  $d/D = 0,86$ )

**Вхідна ділянка труб.** Зниження температури металу трубної дошки і вхідних ділянок труб на вході високотемпературних газів до першого трубного пучка конвективного пакету вирішено за рахунок створення в цій зоні відокремленого трубного пучка. Повітря на охолодження цього пучка подається байпасним потоком повітряного тракту. Байпасний потік відокремлюється від основного в нижній поворотній повітряній камері 5, проходить в окремий канал 15 для подання повітря в повітряний канал 16 відокремленого пучка з коротких димогарних труб 14, омиває його й об'єднується на виході перед жаровою трубою 8 з основним потоком повітря. Подача повітря з великою витратою знижує загальний рівень температури повітря в пучку, а висока швидкість повітря забезпечує інтенсивне охолодження цієї найбільш теплонапруженої поверхні нагрівання.

Суттєве значення для температурного режиму металу труб має форма вхідної кромки на вході в трубу. Дослідження процесу теплообміну вхідних ділянок труб [9] показало, що наявність гострої вхідної кромки з кутом  $90^{\circ}$  приводить до відриву потоку, утворенню завихрення і підвищення локальної тепловіддачі майже у два рази. Плавний вхід в канал [10] забезпечує ламінарний режим течії в приміжовому шарі і знижує рівень тепловіддачі навіть порівняно з ділянкою стабілізації. У зв'язку з цим вузол кріплення труб до трубної дошки виконується з заокругленням.

Для прийняття конструктивних рішень щодо вузла відокремленого трубного пучка конвективного пакету на підставі аналізу наукових досліджень тепловіддачі початкових ділянок труб було розроблено розрахункову модель температурних характеристик вхідної ділянки димогарних труб теплогенератора при різних режимах тепловіддачі. За умови наявності початкових ділянок димогарних труб

з турбулізацією потоку газів (кільцевою накаткою) виникає нерівномірність підігрівання повітря за їхньою довжиною. Це призводить до зростання температури металу вище допустимої в теплонапружених місцях елементів конструкції, наприклад на трубній дошці з боку камери згоряння, на виході жарової труби. Одним із основних факторів, що впливає на рівномірність підігрівання повітря вздовж конвективної частини, є конфігурація початкової ділянки димогарних труб на вході продуктів згоряння з топкової камери (рис. 10).

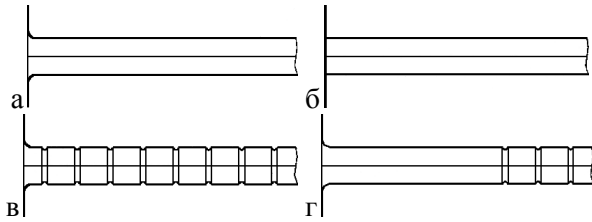


Рис. 10. Типи входних ділянок димогарних труб:  
1 – вхід з гострим краєм гладкої труби; 2 – вхід з профільним краєм гладкої труби; 3 – вхід з профільним краєм труби з кільцевими турбулізаторами; 4 – вхід з профільним краєм гладкої труби та труби з кільцевою накаткою

Найбільш проблемним фактором для початкової ділянки димогарних труб є висока температура підігріву повітря і в деякій мірі – підвищена температура металу. Ефективним засобом зниження температур є подача збільшеної кількості повітря на перші від входу ділянку труб. За збільшеної у два рази подачі повітря температурою 40 °С на ділянку завдовжки 0,1 м відокремленого пучка труб розглянуто вплив на її тепловіддачу (рис. 11) при трьох варіантах конфігурації [13]:

1. Труба з кільцевими турбулізаторами;
2. Комбінація гладкої труби з плавним входом з ламінарним рухом продуктів згоряння з подальшим розташуванням турбулізаторів;
3. Комбінація послідовно розташованих кільцевих турбулізаторів різної інтенсивності – різними параметрами  $d_m/d$ .

За отриманими результатами допустима для експлуатації температура елементів конструкції забезпечується:

- при інтенсивнішому охолодженні повітрям ділянки відокремленого пучка труб;
- виконанні на початковій ділянці кільцевих турбулізаторів послідовно меншої (на довжині 0,5 м) і більшої інтенсивності.

Негативний вплив різниці температурних подовжень жарової труби і димогарних труб конвективного пакету усувається оснащенням поперечної трубної дошки оригінальним вузлом компенсатора теплових подовжень.

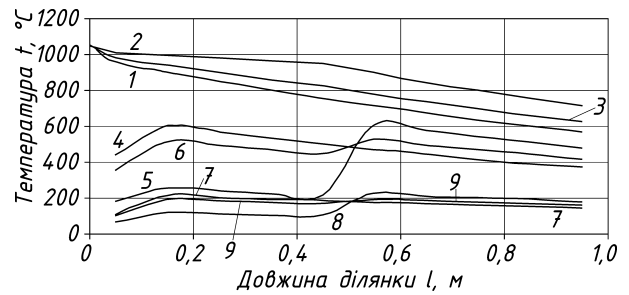


Рис. 11. Температури газів, металу стінок і повітря на початковій ділянці димогарних труб (при різних варіантах конфігурації):  
1 - 3 – температура газів; 4-6 – температура металу стінок; 7-9 – температура повітря; 1, 4, 7 – труба з кільцевими турбулізаторами – стабілізований турбулентний потік;  
2,5,8 – труба комбінована з гладкої ділянки з профільованим входним краєм та ділянки з кільцевими турбулізаторами; 3,6,9 – труба з різним діаметром турбулізаторів ( $d_r/d=0,86$  і  $d_r/d=0,95$ )

**Впровадження.** Наведені вище технічні рішення реалізовано в конструкції високо-температурних повітрянагрівачів-газових теплогенераторів ТГ-0,95-200, ТГ-1,9-200 і ТГ-2,4-200 з температурою нагріву повітря 200 °С. При цьому максимально допустима температура дорівнює 220 °С [14]. Промислове виготовлення цих теплогенераторів впроваджено на ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод» (м. Калинівка, Вінницька обл.) за співпраці фахівців заводу і Науково-дослідного інституту санітарної техніки обладнання будівель і споруд (м. Київ). За технічними рішеннями спеціалістів заводу теплогенераторами ТГ комплектуються нові високоефективні сушильні установки. Теплогенератори ТГ забезпечують [22]:

- високий експлуатаційний коефіцієнт корисної дії теплогенератора (92...93%);
- підвищення продуктивності сушильної установки;
- зниження собівартості продукції;
- зниження питомого споживання умовного палива;
- зниження виробничих витрат;
- технологічність виробничого процесу;
- вивільнення пари для інших виробничих потреб.

Теплогенератори в складі сушильних установок впроваджено в експлуатацію на підприємствах харчової промисловості України та інших держав.

Тривала експлуатація теплогенераторів ТГ підтвердила високу економічність роботи та надійність конструкції для забезпечення технологічного процесу сушіння. Зокрема, теплогенератор ТГ на Шосткінському гормо-

лкомбінаті (Україна) забезпечує бевідмовну роботу сушильної установки протягом 14 років у режимі 20 год/добу цілодобово.

**Висновки.** Розроблена на базі типового теплогенератора для повітряного опалення конструкція теплогенератора для сушильних установок з робочою температурою нагріву повітря до 200 °С (максимально допустима температура складає 220 °С) вирізняється високою економічністю і надійністю. Особливості теплогенератора – попередній підігрів повітря в високотемпературній зоні при прямо-течійному русі та протитечійний і перехресний хід в трубному пучку, а також остаточний нагрів до 200 °С від жарової труби. Це дозволило ефективно впровадити цю конструкцію на ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод». З 2002 року вироблено 135 теплогенераторів,

які впроваджено в експлуатацію в складі сушильних установок на підприємствах харчової промисловості України, Білорусії, Російської Федерації, Азербайджану, Туркменістану, Киргизстану, Узбекистану та Польщі. Реконструкція установок сушильних розпилювальних із застосуванням теплогенераторів забезпечує зниження собівартості та покращення якості готового продукту, збільшення продуктивності на 10-30 %, а також зниження витрати на енергоносії до 50 %. Підтверджена надійна і економічна робота теплогенераторів протягом тривалого періоду експлуатації. Так, теплогенератор ТГ на Шосткінському гормолкомбінаті (Україна) забезпечує бевідмовну роботу сушильної установки протягом 14 років у режимі 20 год/добу цілодобово.

### Література

1. Андерсон. Теплоотдача факела, поперечно обтекающего плоскую и цилиндрическую поверхности / Андерсон, Стресино // Transactions of TUGASME. Series C. Труды американского общества инженеров-механиков (перевод на рус.). Теплопередача. – 1963. – Т. 85, Серия С. – № 1. – С. 61-68.
2. Богачев В.А. Основы контроля тепловой неравномерности пароперегревателей из аустенитных сталей с помощью ферритометра / В.А. Богачев, Д.С. Змиенко // Теплоэнергетика. – 2012. – № 4. – С. 14-21.
3. Вестергаард Вагн. Технология производства сухого молока. Выпаривание и распылительная сушка / Вагн Вестергаард. – Копенгаген: Niro AS, 2003. – 75 с.
4. Гецов Л.Б. Комплексный метод расчета высокотемпературной газовой коррозии деталей и узлов ГТУ / Л.Б. Гецов // Энергомашиностроение. Тяжелая промышленность. – 1995. – № 9. – с. 2-5.
5. Злепко В.Ф. Жаростойкость пароперегревательных труб в зависимости от вида сжигаемого топлива / В.Ф. Злепко, В.А. Локшин // Теплоэнергетика. – 1973. – № 5. – С. 66-70.
6. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
7. Калинин Э.К. Интенсификация теплообмена в каналах / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.А. Ярхо. – Москва: Машиностроение, 1972. – 234 с.
8. Кошкин В.К. Теплообменные аппараты и теплоносители (теория и расчет) / В.К. Кошкин, Э.К. Калинин. – Москва: Машиностроение, 1971. – 200 с.
9. Легкий В.М. Локальный теплообмен в начальном участке трубы с острой кромкой. 2. Поправка на начальный участок при турбулентном течении в пограничном слое / В.М. Легкий, В.А. Рогачов // Инженерно-физический журнал. – 1993. – Т. 65. – № 2. – С. 139-143.
10. Легкий В.М. Теплообмен на термическом начальном участке при стабилизированном турбулентном течении воздуха в круглых трубах и прямоугольных каналах / В.М. Легкий, А.С. Макаров // Инженерно-физический журнал. – 1971. – Т. 20, № 2. – С. 215-223.
11. Макаров А.С. Аналіз теплової схеми газових високотемпературних повітонагрівачів / А.С. Макаров, М.П. Сенчук // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка: наук.-техн. зб. – Київ, 2004. – №19. – С. 51-54.
12. Макаров А.С. Розрахунковий аналіз температури напружених поверхонь нагрівання високотемпературних повітонагрівачів / А.С. Макаров, М.П. Сенчук // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка: наук.-техн. зб. – Київ, 2005. – № 20. – С. 67-70.
13. Макаров А.С. Температурний режим вхідної ділянки труб конвективної частини високотемпературних повітонагрівачів / А.С. Макаров, М.П. Сенчук / Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка: наук.-техн. зб. – Київ, 2006. – № 23. – С. 105-112.
14. Патент на винахід 84734 Україна МПК (2006) F24H 3/02 F23L 15/04 (2006.01). Повітонагрівач/Макаров А.С., Сенчук М.П., Ходос А.І., Кирієнко М.О.; власник Науково-технічне товариство «Бірюза-4» – № а 2006 09105 ; заявл. 16.08.2006; права на винахід 25.11.2008, опубл. 25.11.2008, бюл. № 22. – 2 с.
15. Переработка молока / APV Angydro A/S/ Dryng & Evaporation. – 2002. – № 1. – С. 6 -7.
16. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей / Ю.М. Пчелкин. – Москва: Машиностроение, 1984. – 280 с.

17. Сторожук Я.П. Расчет температуры металла пламенной трубы / Я.П. Сторожук, В.И. Антоновский // Труды ЦКТИ. – 1967. – № 57. – С. 156-173.
18. Сударев А.В. К расчету температуры стенки пламенной трубы камеры сгорания ГТУ / А.В. Сударев // Энергомашиностроение. Тяжелая промышленность. – 1965. – № 8. – С. 15-17.
19. Блох А.Г. Теплообмен излучением: справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
20. Тюльпин К.К. Жаростойкость котельных сталей в среде продуктов твердого, жидкого и газообразного топлива / К.К. Тюльпин, А.И. Максимов // Теплоэнергетика. – 1971. – № 8. – С. 6-9.
21. Гришин М.А. Установки для сушки пищевых продуктов: справочник / М.А. Гришин, В.И. Атаназевич, Ю.Г. Семенов. – Москва: Агропромиздат, 1989. – 166 с.
22. Ходос А.И. Снижение себестоимости производства сухих молочных продуктов / А.И. Ходос, М.А. Кириенко // Производственно-практический журнал «Молочное дело». – Київ, 2002. – № 1. – С. 3-8.
23. Шнейдлин А.Е. Излучательные свойства твердых материалов / А.Е. Шнейдлин. – Москва: Энергия, 1974. – 324 с.

### References

1. Anderson, Stresino. “Teplootdacha fakela, poperechno obtekauiushchego ploskuii i tsilindricheskuii poverkhnosti”. *Transactions of TUGASME. Series C. Trudy amerikanskoho obshchestva inzhenerov-mekhanikov (perevod na rus.). Teploperedacha*. 1963. T. 85, Seriiia S. № 1. S. 61-68.
2. Bogachev V.A., Zmiienko D.S. “Osnovy kontroliia teplovoi neravnomernosti paroperehrevatelei iz austenitovykh stalei s pomoshchiu ferritometra”. *Teploenerhetika*. 2012. № 4. C. 14-21.
3. Vestergaard Vagn. *Technologiia proizvodstva sukhogo moloka. Vyparivanie i raspylitelnaia sushka*. Niro AS, 2003.
4. Gezov L.B. “Kompleksnyi metod rascheta vysokotemperaturnoi gazovoi korrozii detalei i uzlov HTU.” *Energomashinostroiennii. Tiazhelaia promyshliennost*. 1995. № 9. S. 2-5.
5. Zlepko V.F., Lokshin V.A. “Zharostoikost paroperegrevatelnykh trub v zavisimosti ot vida szhigaemogo topliva”. *Teploenerhetika*. 1973. № 5. S. 66-70.
6. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha*. Energoizdat, 1981.
7. Kalinin E.K., Dreizer H.A., Yarkho S.A. *Intensifikaziia tieploobmienna v kanalakh*. Mashinostroiennii, 1972.
8. Koshkin V.K., Kalinin E.K. *Teploobmennyye apparaty i teponositeli (teoriia i raschet)*. Mashinostroiennii, 1971.
9. Lehkii V.M., Rohachov V.A. “Lokalnyi teploobmen v nachalnom uchastke truby s ostroi kromkoi. 2. Popravka na nachalnyi uchastok pri turbulentnom techenii v pogranichnom sloe”. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1993. T. 65. № 2. S. 139-143.
10. Lehkii V.M., Makarov A.S. “Teploobmen na termicheskom nachalom uchastkie pri stabilizirovannom turbulentnom techenii vozdukha v krugykh trubakh i priamougolnykh kanalakh”. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1971. T. 20. № 2. S. 215-223.
11. Makarov A.S., Analiz teplovoi skhemy hazovykh vysokotemperaturnykh povitronahrivachiv/ A.S. Makarov M.P. // *Budivelni materialy, vyroby ta sanitarna tekhnika*. 2004. №19. C. 51-54.
12. Makarov A.S., Senchuk M.P. “Rozrakhunkovyi analiz temperatury napruzhenykh poverkhon nahrivannia vysokotemperaturnykh povitronahrivachiv”. *Budivelni materialy, vyroby ta sanitarna tekhnika*. 2005. № 20. S. 67-70.
13. Makarov A.S., Senchuk M.P. “Temperaturnyi rezhym vkhidnoi dilianky trub konvektyvnoi chastyny vysokotemperaturnykh povitronahrivachiv”. *Budivelni materialy, vyroby ta sanitarna tekhnika*. 2006. № 23. S. 105-112.
14. Makarov A.S., Senchuk M.P., Khodos A.I., Kiriienko M.O. “Povitronahrivach”. Patent of Ukraine 84734. 25.11.2008.
15. Pererabotka moloka / APV Angydro A/S/ Dryng & Evaporation. 2002. № 1. S. 6 -7.
16. Pchelkin Yu.M. *Kamery sgoraniia gazoturbinykh dvigatelei*. Mashinostroiennii, 1984.
17. Storozhuk Ya.P., Antonovskii V.I. “Расчет температуры металла пламенной трубы”. *Trudy ZKTI*. 1967. № 57. S. 156-173.
18. Sudarev A.V. “K raschetu temperatury stenki plamennoi truby kamery sgoraniia HTU”. *Energomashinostroiennii. Tiazhelaia promyshliennost*. 1965. № 8. S. 15-17.
19. Blokh A.H., Khuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. *Teploobmen izlucheniiem: spravochnik*. Energoatomizdat, 1991.
20. Tiulpin K.K., Maksimov A.I. “Zharostoikost kotelnykh stalei v sredie produktov tverdogo, zhidkogo i gazoobraznogo topliva”. *Teploenergetika*. 1971. № 8. S. 6-9.
21. Grishin M.A., Atanazevich V.I., Semenov Yu.H. *Ustanovki dla sushki pishchevykh produktov: spravochnik*. Agropromizdat, 1989.
22. Khodos A.I., Kiriienko M.A. “Snizhenie sebestoimosti proizvodstva sukhikh molochnykh produktov”. *Molochnoe delo*. 2002. № 1. S. 3-8.
23. Shneidlin A.E. *Izluchatelnie svoistva tverdyykh materialov*. Energiia, 1974.



УДК 662.995

## Повышение эффективности технологической схемы промышленного высокотемпературного воздушонагревателя

А. С. Макаров<sup>1</sup>, М. П. Сенчук<sup>2</sup>, А. І. Ходос<sup>3</sup>, М. О. Кириенко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., ст. науч. сотр., ПрАТ «Калиновский машиностроительный завод», г. Калиновка, Украина, [makarov.anatoly@kmbp.com.ua](mailto:makarov.anatoly@kmbp.com.ua).

<sup>2</sup>к.т.н., доц., Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [smp\\_21@ukr.net](mailto:smp_21@ukr.net).  
ORCID: 0000-0001-8968-7336.

<sup>3</sup>председатель наблюдательного совета ПрАТ «Калиновский машиностроительный завод», [khodos@kmbp.com.ua](mailto:khodos@kmbp.com.ua)

<sup>4</sup>заместитель директора ПрАТ «Калиновский машиностроительный завод», [mihail\\_kirienko@ukr.net](mailto:mihail_kirienko@ukr.net)

***Аннотация.** Проанализированы две типовые схемы нагрева воздуха в газомазутных воздушонагревателях (теплогенераторах), конструктивное отличие которых заключается в различном взаимном расположении жаровой трубы-камеры сгорания и конвективной поверхности нагрева (дымогарных труб). Описана усовершенствованная конструктивная схема разработанного высокотемпературного воздушонагревателя-теплогенератора с нагревом воздуха для технологических процессов сушки. Отмечены основные технические и эксплуатационные преимущества принятой схемы нагрева воздуха, которая отличается высокой экономичностью и надёжностью. Рассмотрены новые технические решения в разработанной конструкции теплогенератора ТГ направленные на повышение его эффективности и надёжности при длительной эксплуатации. Принятие этих решений обосновано на основании лабораторных и расчётных исследований. Приведена схема огневого стенда по изучению процесса отвода теплоты от теплонапряжённых поверхностей нагрева путём радиационно-конвективной теплопередачи с применением теплопоглощающих экранов. Описаны сконструированные системы охлаждения жаровых труб теплогенераторов на основании стендовых исследований и разработанной соответствующей расчётной модели. Приведены расчётные зависимости изменения температуры металла нагретых стенок от скорости воздушного потока в одинарном канале и от ширины двойного воздушного канала с теплопоглощающим экраном. Показаны результаты расчётных исследований с целью оптимизации конвективной поверхности нагрева и входных участков дымогарных труб в виде зависимостей изменения длины конвективных пакетов в зависимости от скорости дымовых газов, температуры газов, металла стенок и воздуха на начальном участке дымогарных труб при различных вариантах ее конфигурации. Реализованы запатентованные технические решения в конструкциях промышленно внедрённых высокотемпературных воздушонагревателей – газовых теплогенераторов ТГ-0,95-200, ТГ-1,9-200 и ТГ-2,4-200 с температурой нагрева воздуха 200 °С. Подтверждена их высокая экономичность и надёжность в течение многолетней эксплуатации в составе сушильных установок на предприятиях пищевой промышленности Украины, Белоруссии, Российской Федерации, Азербайджана, Узбекистана, Туркменистана, Кыргызстана, Польши.*

***Ключевые слова:** высокотемпературный воздушонагреватель, теплогенератор, схема нагрева воздуха, технологический процесс сушки, нагретый воздух*

UDC 662.995

## Improving the efficiency of the technological scheme of industrial high-temperature air heater

A. Makarov<sup>1</sup>, M. Senchuk<sup>2</sup>, A. Khodos<sup>3</sup>, M. Kirienko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>PhD, SRF, PJSC "Kalinov Machine-Building Plant", Kalinovka, Ukraine, [makarov.anatoly@kmbp.com.ua](mailto:makarov.anatoly@kmbp.com.ua).

<sup>2</sup>PhD, associate professor., Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine, [smp\\_21@ukr.net](mailto:smp_21@ukr.net).  
ORCID:0000-0001-8968-7336

<sup>3</sup>Deputy Director for Research, Scientific and Technical Center "BIRYuZA", Kyiv, Ukraine, [khodos@kmbp.com.ua](mailto:khodos@kmbp.com.ua)

<sup>4</sup>Head of the dairy equipment department, Scientific and Technical Center "BIRYuZA", Kyiv, Ukraine, [mihail\\_kirienko@ukr.net](mailto:mihail_kirienko@ukr.net)

**Abstract.** Two typical schemes of air heating in gas-oil air heaters (heat generators) are analyzed, the structural difference of which is characterized by the mutual location of the fire tube - combustion chamber and convective heating surface (chimneys). The improved constructive scheme of the developed high - temperature air heater - heat generator with air heating for technological processes of drying is described. The main technical and operational advantages of the accepted scheme of heating of air which differs in high economy and reliability are noted. New technical solutions in the developed design of the TG heat generator are considered for the purpose of increase of its efficiency and reliability at long operation. The adoption of these decisions on the basis of laboratory and computational research is substantiated. The scheme of the fire stand on studying the process of heat removal from heat-stressed heating surfaces by radiation-convective heat transfer with the use of heat-absorbing screens is given. Designed cooling systems for heat pipes of heat generators are described on the basis of bench researches and the calculation model is developed. The calculated dependences of the change in the temperature of the metal of the heated walls on the velocity of the air flow in a single channel and on the width of the double air channel with a heat-absorbing screen are given. The results of calculation researches for the purpose of optimization of a convective surface of heating and entrance sites of chimneys in the form of dependences of change are shown: length of convective packages depending on speed of flue gases; temperature of gases, metal of walls and air on the initial section of chimneys at various options of its configuration. Patented technical solutions in the designs of industrially implemented high-temperature air heaters - gas heat generators TG-0.95-200, TG-1.9-200 and TT-2,4-200 with an air heating temperature of 200 oC have been implemented. Their high efficiency and reliability during many years of operation as a part of drying installations at the enterprises of the food industry of Ukraine, Belarus, the Russian Federation, Azerbaijan, Uzbekistan, Turkmenistan, Kyrgyzstan, Poland are confirmed.

**Keywords:** high-temperature air heater, heat generator, air heating scheme, technological process of drying, heated air

Надійшла до редакції / Received 06.11.2021