

ОБГРУНТУВАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В УСТАНОВКАХ ІЗ АЕРОДИНАМІЧНИМ НАГРІВОМ

О.П. Колісник, І.В. Коц

Вступ

В роботах [1–4] нами були розглянуті існуючі технології тепловологісної обробки будівельних виробів і матеріалів. Альтернативою розглянутим технологіям було прийнято застосування новітньої технології аеродинамічного нагріву [4], згідно якої, основний теплогенеруючий пристрій – аеродинамічний нагрівач роторного типу здійснює безперервну рециркуляцію повітряного потоку і внаслідок аеродинамічних втрат в ньому відбувається постійний нагрів повітряного середовища у замкненому просторі теплоізольованої робочої камери. Потік гарячого повітря, що здійснює рециркуляцію в робочій камері, передає тепло елементам робочої камери і рівномірно розігріває виріб.

Постановка задачі

Поставлена задача полягає у обґрунтуванні фізичної природи генерації теплової енергії в установках із аеродинамічним нагрівом роторного типу для теплової обробки будівельних виробів, відпрацюванню раціональних технологічних режимів, дослідження яких сприятимуть вдосконаленню запропонованої технології, завдяки підбору і оптимізації основних параметрів технологічного процесу та його окремих операцій, що повинно забезпечити зменшення енерговитрат.

Виклад основного матеріалу

Енергія, яку повітря отримує в аеродинамічному нагрівачі роторного типу (АНРТ), використовується для його переміщення по розподільчих каналах та покриття втрат в них, пов'язаних з тертям, вихроутворенням, з втратами на місцевих опорах та забезпечення заданої вихідної швидкості.

Для пояснення причини генерації теплової енергії при роботі АНРТ розглянемо основні залежності руху повітря в між лопатковому просторі робочого колеса. Виділимо переріз між двома сусідніми лопатками і розглянемо рух повітря в ньому рис. 1 [5].

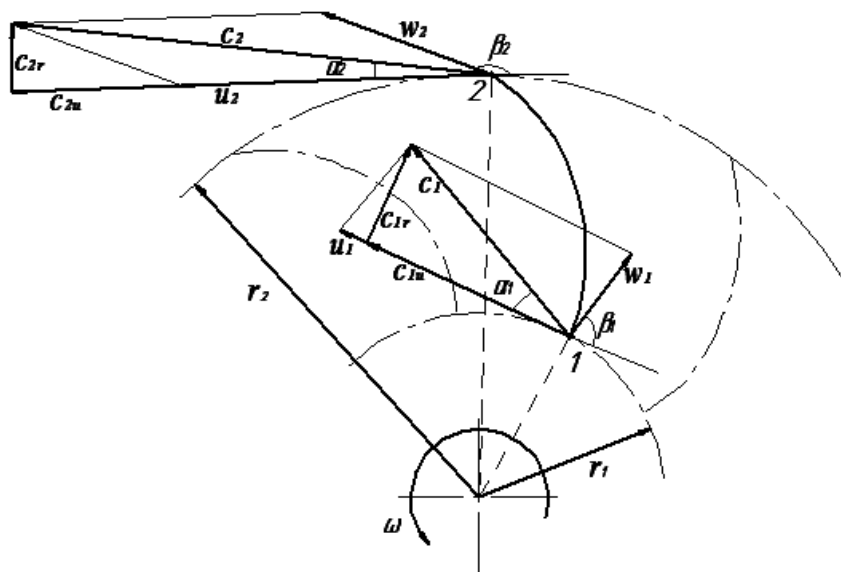


Рис. 1. Паралелограми швидкостей в робочому колесі АНРТ

Енергія яка передається повітря робочим колесом визначається значеннями абсолютних c , відносних w і колових u швидкостей під час входу і виходу з між лопаткового простору.

Нехай на вході в робоче колесо (точка 1) є колова швидкість u_1 , відносна швидкість w_1 та абсолютна швидкість c_1 (рис. 1). Напрямок швидкості w_1 визначається кутом β_1 , який називається кутом входу. На виході з робочого колеса (точка 2) отримуємо відповідно швидкості u_2, w_2, c_2 . Напрямок швидкості w_2 визначається кутом виходу β_2 . таким чином на вході і виході з робочого колеса ми отримуємо трикутники швидкостей, рис. 2.

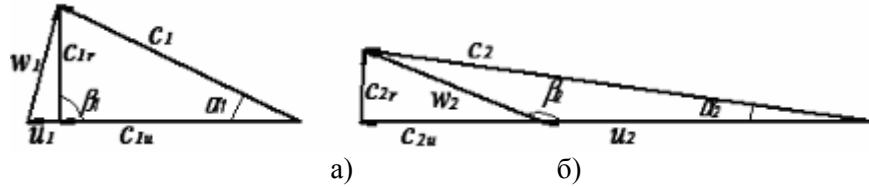


Рис. 2. Трикутники швидкостей в АНРТ:

а) на виході з робочого колеса, б) на вході в робоче колесо

Як видно з даного рисунка, абсолютну швидкість потоку можна розкласти на радіальну (витратну) складову $c_r = c \cdot \sin \alpha$ та колову складову $c_u = c \cdot \cos \alpha$ так звану швидкість закручування.

Відповідно до теореми про зміну моменту кількості руху при встановленому русі зміна моменту кількості руху потоку повітря, яке проходить через робоче колесо АНРТ за одиницю часу, дорівнює моменту сил M_0 реакції лопаток.

Зміна моменту кількості руху потоку повітря, яке пройшло через робоче колесо АНРТ, дорівнює:

$$\rho L c_{2u}^{\infty} r_2 - \rho L c_{1u}^{\infty} r_1, \tag{1}$$

де L – витрата повітря;
 ρ – густина повітря;
 r_1, r_2 – радіус відповідно вхідного і вихідного перерізу робочого колеса.
 Згідно з теоремою та після перетворень отримаємо:

$$M_0 = \frac{1}{2\pi} \rho L (2\pi c_{2u}^{\infty} r_2 - 2\pi c_{1u}^{\infty} r_1) \tag{2}$$

Циркуляція повітря навколо лопаток робочого колеса:

$$\Gamma_1 = 2\pi r_1 c_{1u}^{\infty}; \quad \Gamma_2 = 2\pi r_2 c_{2u}^{\infty}. \tag{3}$$

де Γ_1 – циркуляція швидкості на вході в робоче колесо;
 Γ_2 – циркуляція швидкості на виході з робочого колеса.
 Підставивши (3) в (2) отримаємо:

$$M_0 = \frac{1}{2\pi} \rho L (\Gamma_2 - \Gamma_1) \tag{4}$$

Різниця $\Gamma_2 - \Gamma_1$ дорівнює сумі циркуляції швидкості навколо всіх лопаток робочого колеса. Помноживши обидві частини рівняння (4) на кутову швидкість обертання робочого колеса ω_0 , перейдемо до потужності

$$M_0 \cdot \omega_0 = \rho \frac{L \cdot \omega_0}{2\pi} (\Gamma_2 - \Gamma_1) \tag{5}$$

де ω_0 – колова швидкість.
 Отже, ліва частина виразу (5) – визначає роботу, здійснену силами реакції лопаток АНРТ за одиницю часу – потужність, яка передається повітря лопатками робочого колеса. Дана потужність є потужністю на валу N_B :

$$N_B = \Delta p_T L, \quad (6)$$

де Δp_T – теоретичний тиск АНРТ. Робота яку здійснюють сили реакції лопаток робочого колеса віднесено до об'єму повітря, що проходить через АНРТ.

Для пояснення причини генерації теплової енергії при аеродинамічному нагріві визначимо теоретичний тиск з врахуванням вище викладеного та після перетворень запишемо рівняння Ейлера для роботи АНРТ

$$\Delta p_T = \rho \frac{\omega_0}{2\pi} (\Gamma_2 - \Gamma_1) \quad (7)$$

Рівняння (7) пов'язує тиск АНРТ з швидкістю руху повітря в робочому колесі, яка залежить від подачі, частоти обертання приводу, геометрії робочого колеса тощо.

Зміна теоретичної потужності ΔN_T , внаслідок закручування потоку при проходженні в між лопатковому просторі робочого колеса АНРТ, дає основну частину теплової енергії на нагрівання повітря.

$$\Delta N_T = \rho L \omega_0 [(r_2 c'_{2u} - r_2 c_{2u}) - r_1 c_{1u}], \quad (8)$$

де c'_{2u} – колова складова абсолютної швидкості на виході з колеса при закручуванні потоку перед ним.

Аеродинамічний нагрівач роторного типу (АНРТ) [6] з приєднаними до нього всмоктуючими та нагнітальними розподільчими каналами показаний на рис. 3.

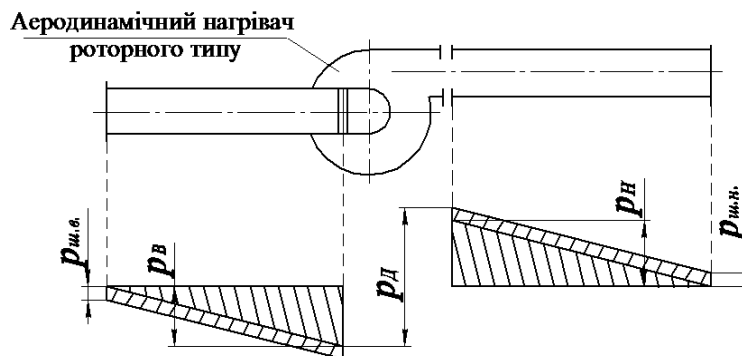


Рис. 3. Схема установки з аеродинамічним нагрівачем роторного типу

Дійсний тиск p_D витрачається на покриття втрат у всмоктуючих розподільчих каналах p_B та нагнітальних розподільчих каналах p_H та втрат на забезпечення заданої вихідної швидкості $p_{ш.н.}$

Баланс розподілення енергії повітря у АНРТ може бути представлений у вигляді дійсного тиску p_D :

$$p_D = p_B + p_H + p_{ш.н.} \quad (9)$$

Витрата енергії на створення швидкості у всмоктуючих розподільчих каналах $p_{ш.в.}$ за рахунок дійсного тиску p_D , створеного АНРТ, тут не відбувається. Ця швидкість і відповідний їй динамічний тиск $p_{ш.в.}$ створюється атмосферним тиском при наявності розрідження на вході, який дорівнює p_B . Тому величина в рівнянні балансу енергії $p_{ш.в.}$ не відображається і не враховується. Використовуючи правила розмірностей можна написати рівняння

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Дж/м}^3, \quad (10)$$

звідки можна зробити висновки, що дійсний тиск p_D – механічна енергія, яку отримало повітря в

АНРТ на кожний кубічний метр. Механічна енергія, яка витрачена на переміщення повітря складе

$$W = L \cdot p_{\text{д}}, [\text{Вт}]. \quad (11)$$

Це і є механічна робота, яку виконує повітря при переміщенні в розподільчих каналах. Повітря може виконати її завдяки тому, що отримало необхідний запас енергії в АНРТ.

Для визначення кількості енергії, яка витрачається на привід ротора аеродинамічного нагрівача, при умові, що повітря отримало в ньому запас енергії, який дорівнює W , позначимо через W_e . Тоді $W_e > W$, тобто споживана приводом АНРТ енергія W_e більша, ніж енергія W , яка отримана в ньому переміщуваним повітрям. Така нерівність пояснюється тим, що ККД АНРТ не дорівнює 1. В аеродинамічному нагрівачі є втрати на тертя дисків ротора об середовище, в якому вони обертаються, на тертя і вихороутворення в міжлопатевих каналах робочого колеса, на тертя при русі повітря по напрямних раглика кожуха, на удар при виході повітря із міжлопатевих каналів робочого колеса до порожнини раглика кожуха, втрати на вході при повороті потоку від осевого напрямку до радіального і на удар при вході в міжлопатеві канали робочого колеса. Ці втрати потребують затрат додаткової енергії за рахунок приводного двигуна і для повітря є витраченими: повітря в АНРТ отримує корисний запас енергії, який визначається залежністю (2.3).

Для АНРТ зі всмоктуючим та нагнітальним трубопроводами

$$W_e = W' + W, [\text{Вт}], \quad (12)$$

Тобто механічна енергія, що витрачена на обертання ротора аеродинамічного нагрівача, витрачається на компенсацію втрат W' в АНРТ та компенсацію втрат в розподільчих каналах. Втрати W' в АНРТ, в кращому випадку, складають в межах 20% витраченої на обертання ротора механічної енергії W_e . Втрати тиску на подолання тертя в розподільчих каналах для переміщення повітря є корисною роботою АНРТ. Їх можна виразити через вихідну швидкість:

$$p_{\text{ш.н.}} = c^2 \cdot \rho / 2, [\text{Па або Дж/м}^3]. \quad (13)$$

Знаючи величину швидкості виходу газу з нагнітальних розподільчих каналах c (м/с), можна визначити втрати з вихідною швидкістю. Сума втрат на покриття опорів в розподільчих каналах складає:

$$p_{\text{д}} - p_{\text{ш.н.}} = p_{\text{в}} + p_{\text{н}} \quad (14)$$

Ці втрати перетворюються в теплову енергію. Але АНРТ завжди переміщує повітря, яке й переносить цю теплоту до виходу з нагнітальних розподільчих каналів, за винятком певних втрат тепла в навколишнє середовище через теплоізоляцію корпусу установки.

Втрати W' в АНРТ не зникають. Вони проявляються в поступовому підвищенні температури повітряного середовища, що переміщається АНРТ та викидається з нагнітальних розподільчих каналах з певною вихідною швидкістю, але їх важко визначити, оскільки збільшення температури ледь помітне, хоча потужність, яка витрачається на привід АНРТ, досягає в багатьох випадках значної величини.

На рис. 4 показана установка з АНРТ, що працює в замкнутій системі розподільчих каналів.



Рис. 4. Схема установки із аеродинамічним нагрівачем роторного типу із замкнутою системою розподільчих каналів

АНРТ переміщує по замкнутій системі розподільчих каналів один й той самий об'єм повітря, що перебуває в розподільчих каналах та самому аеродинамічному нагрівачі. В замкнутій системі розподільчих каналів є втрати на покриття опорів, оскільки в них виникає рух повітря з визначеною швидкістю. Ротором аеродинамічного нагрівача ці втрати безперервно поновлюються. В АНРТ також є свої втрати та визначена витрата потужності або механічної енергії на обертання ротора.

Після пуску двигуна, що приводить в обертальний рух ротор, в пропарювальній камері виникає нагрів розподільчих каналів і корпусу робочої камери. Нагрів повітря всередині замкнутої системи визначається за приладами для вимірювання температури. Нагрів стане ще більш інтенсивним, якщо система розподільчих каналів та АНРТ будуть ізолювані для зменшення втрат тепла в навколишнє середовище. В цьому випадку вся механічна енергія W_e , що витрачається на обертання ротора, переходить в теплоту, що здійснюватиме нагрівання повітря, яке рухається в замкнутій системі. Втрати W' в АНРТ, а також втрати W в розподільчих каналах також є корисними та переходять в теплоту, що нагріває повітряне середовище в робочій камері.

Таким чином, АНРТ є нагрівачем повітря. Його ККД має досить високе значення критерію ефективності, оскільки майже всі 100% витраченої на обертання ротора механічної енергії W_e переходять в теплоту. Витрачена на обертання ротора механічна енергія W_e в цілому визначає роботоспроможність ротора q , а при переведенні одиниць теплоти в тепловий ефект ротора, як нагрівача повітря, вона виражається таким співвідношенням:

$$q = A \cdot W_e = W_e / 427, [\text{Вт/год}] \quad (15)$$

де $A = 1/427 \text{ Вт/кг} \cdot \text{м}$ – тепловий еквівалент роботи.

При визначенні аеродинамічних характеристик роторів аеродинамічних нагрівачів, що застосовуються для установок з АНРТ, виявлена залежність роботи [6], що витрачена на обертання ротора, від кількості повітря, що переміщується у вигляді функції:

$$W_e = f(v), [\text{Вт}] \text{ при густині повітря } \rho_n = 1,2 \text{ кг/м}^3. \quad (16)$$

Роботоспроможність ротора W_e та його тепловий ефект залежать від густини повітря, що переміщується ротором, та пропорціональні йому. Але повітря, що знаходиться в робочій камері, нагрівається, а його густина з підвищенням температури зменшується [5]. Тепловий ефект та роботоспроможність ротора зменшуються з підвищенням температури в робочій камері.

Виходячи із рівняння стану газу (рівняння Клапейрона), можна записати наступне:

$$M = p/R \cdot T, \quad (17)$$

де M – масова витрата повітря, кг/с;

p – абсолютний тиск повітря, що знаходиться в робочій камері, Па;

R – газова стала, Дж/кг·К;

T – абсолютна температура повітря або газу в робочій камері, К.

Абсолютний тиск p змінюється не досить суттєво (ротор створює відносно незначний надлишковий тиск), а тому масова витрата повітря, що переміщується ротором, обернено пропорційна абсолютній температурі в установці. Це відноситься також і до теплового ефекту та роботоспроможності ротора, які враховуються при розрахунках установок з аеродинамічним нагрівом. Таким чином, змінюючи перерізи всмоктуючих чи нагнітальних розподільчих каналів ротора аеродинамічного нагрівача, можна регулювати його продуктивність. Температура в робочій камері буде змінюватись згідно заданого режиму.

В звичайних АНРТ установках ККД досить низький, в рециркуляційних нагрівальних установках [6], якщо не враховувати втрати тепла в навколишнє середовище через теплоізоляцію корпусу установки, ККД стає близьким до одиниці, так як майже вся витрачена на привід механічна енергія W_e переходить в теплоту, нагріваючи повітря. Ефект теплоутворення залежить в основному від параметрів аеродинамічного нагрівача. Втрати всередині АНРТ, що виникають при русі повітря, перетворюються в теплоту та підвищують загальний ККД пропарювальної камери. На цьому принципі сконструйовано, виготовлено та на протязі багатьох років експлуатується серія

різноманітних установок з АНРТ для різноманітних технологічних процесів [6].

Температура в установках із АНРТ регулюється наступними способами:

- зміною числа обертів;
- періодичними автоматичними включеннями та відключеннями ротора аеродинамічного нагрівача в залежності від теплового балансу в робочій камері;
- автоматичною зміною продуктивності ротора аеродинамічного нагрівача.

В основу способу регулювання температури автоматичною зміною продуктивності ротора аеродинамічного нагрівача закладені властивості повітря змінювати свою густину в залежності від температури.

Як привід ротора установок з АНРТ доцільніше застосовувати електродвигун. Неелектричні приводи, наприклад, двигуни внутрішнього згорання, можуть застосовуватися переважно в польових умовах, зокрема, на будівельних майданчиках, при відсутності системи електропостачання.

Висновки

- Розкрито та обґрунтовано фізичну природу генерації теплової енергії в установках із аеродинамічним нагрівом роторного типу для теплової обробки будівельних виробів. Запропоновано принципову схему виконання установки з аеродинамічним нагрівачем роторного типу, яка може бути застосована в різних технологічних процесах, що пов'язані з тепловою обробкою будівельних виробів та матеріалів.
- У всіх випадках забезпечується висока рівномірність температури по всьому об'єму робочої камери установки та більш високі техніко-економічні показники вибухо-, пожежобезпеки.
- Тиск повітря в такій системі замкнутих розподільчих каналів буде незначним. Така система дешева, проста та економічна в експлуатації.
- Нагрівальні установки з роторним нагрівом не потребують рідкого або газоподібного палива та дорогих електричних нагрівачів. Метал в них нагрівається рівномірно по всьому об'єму робочої камери. Передача тепла відбувається за рахунок конвективного теплообміну, що забезпечує рівномірність нагріву.
- В установках з замкнутим контуром для потоку повітря та роторним нагрівом відсутня небезпека ураження струмом обслуговуючого персоналу або вибуху. Їх можна повністю автоматизувати.

Список літератури

1. Сліпенька О. П., Коц І. В. Аналітичне дослідження автоклавних установок із аеродинамічним нагрівом / О. П. Сліпенька, І. В. Коц. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – № 5. – С. 93.
2. Сліпенька О. П. Енергозбереження при автоклавному обробленні будівельних виробів / О. П. Сліпенька. // Вісник ВПП – 2007. – № 4. – С. 24–27.
3. Колісник О.П. Перспективи використання автоклавної обробки будівельних виробів / О.П. Колісник // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2007. – № 4. – С. 75–78.
4. Пат. 18723 Україна, МПК В01J 3/04. Автоклавна установка тепловологісної обробки / Сліпенька О. П., Сторожук С. Б., Коц І. В.; заявник і патентодержатель Вінницький нац. техн. ун-т. – № u 200605904; Заявлено 29.05.2006; Опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11.
5. Поляков В.В. Насосы и вентиляторы / В.В. Поляков, Л.С. Скворцов. – М.: Стройиздат, 1990. – 336 с.
6. Тевис П.И. Рециркуляционные установки аэродинамического нагрева / П.И. Тевис, В.А. Ананьев, Е.Г. Шадек. – М.: Машиностроение, 1986. – 208 с.

Колісник Олена Петрівна – асистент кафедри теплогазопостачання Вінницького національного технічного університету.

Коц Іван Васильович – к.т.н., доцент кафедри теплогазопостачання Вінницького національного технічного університету.