

Іродов В.Ф.

ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

Шантала Д.Є.

ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРУБЧАСТОГО ГАЗОВОГО НАГРІВАЧА, РОЗТАШОВАНОГО У ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ КАНАЛІ

Одним зі шляхів підвищення ефективності роботи систем теплопостачання є використання трубчастих газових нагрівачів, які є автономними, високоефективними та багатофункціональними системами. Розроблено технічне рішення трубчастого газового нагрівача, розташованого у горизонтальному каналі, конструкція якого зводить до мінімуму використання променистого складника теплообміну та призначена переважно для нагрівання зовнішнього повітря і подальшого використання його у вигляді вузьконаправленого конвективного теплового потоку. Розроблено математичну модель трубчастого газового нагрівача, розташованого у підземному горизонтальному каналі, характерною особливістю якої є наявність взаємного зв'язку теплового та гідравлічного режимів газової частини нагрівача з режимом підігріву зовнішнього повітря – повітряною частиною. З урахуванням цього факту модель являє собою гідравлічний ланцюг з розподіленими та регульованими параметрами.

Ключові слова: математичне моделювання, трубчастий газовий нагрівач, підземний горизонтальний канал, нагріте повітря, вузьконаправлений конвективний тепловий потік.

Постановка проблеми. Ресурсозбереження натеper є дуже актуальним питанням. Очевидною є необхідність розробки та впровадження нових, прогресивних рішень щодо підвищення ефективності роботи систем теплопостачання.

Одним зі шляхів вирішення цього питання є використання трубчастих газових нагрівачів, які є автономними, високоефективними та багатофункціональними системами. Вони одночасно здатні поєднувати в собі функції теплогенеруючих пристроїв, опалювальних приладів, акумуляторів теплоти, підігрівачів води та повітря. Трубчасті газові нагрівачі можуть бути вбудованими в будівельні конструкції, працювати з рециркуляцією теплоносія та на різних видах палива.

Необхідно продовжувати дослідження нових можливостей застосування трубчастих газових нагрівачів для підвищення енергоефективності процесів опалення та підігріву повітря, а також виконувати розробку науково-методичної бази для проведення моделювання, розрахунків та будівництва нових технічних рішень систем теплопостачання з трубчастими нагрівачами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Натеper для підвищення енергоефективності систем теплопостачання розроблено технічні рішення з трубчастими газовими нагрівачами [1], серед яких – нагрівачі: з подачею підігрітого повітря на газовий пальник; з підігрівом припливного повітря; з ежектором; з рециркуляцією

та природним рухом теплоносія; багатоконтурні; типу «газоповітряна суміш–вода»; розташовані у будівельних конструкціях та інші. Висока ефективність цих нагрівачів, мала інерційність систем теплопостачання, а з ними і низькі капітальні витрати зумовили досить широке застосування таких систем практично у всіх регіонах України.

Для розробки математичних моделей указаних технічних рішень використовуються принципи гідравлічних ланцюгів з розподіленими параметрами, а для розрахунку – еволюційні алгоритми випадкового пошуку [2].

Аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень, а також відомих технічних рішень трубчастих газових нагрівачів показав, що у разі використання трубчастих газових нагрівачів для теплопостачання вагому частину займає конвективний спосіб передачі теплоти за рахунок нагрівання навколишнього повітря, що оточує трубчастий нагрівач. Конвективний складник процесу теплопередачі може бути корисним або виступати втратою теплоти відносно її використання. Тому є відомі технічні рішення променистих нагрівачів, які передбачають раціональне використання теплового повітря.

Є технічні рішення, які дають змогу використовувати конвективне нагріте повітря на опалення приміщення. Одним з таких технічних рішень є пристрій променистого опалення (рис. 1), що містить джерело теплоти, наприклад газовий

пальник, трубчастий лінійний нагрівач та розташований над ним відбивач теплових потоків. Відбивач теплових потоків такого пристрою виконаний у вигляді багатошарового зонта, перший його шар виконано суцільним з поверхневою теплоізоляцією, а кожний наступний – з перфорацією, при цьому перфорація на одному шарі зміщена відносно перфорації на іншому шарі в шаховому порядку, канали між шарами зонта сполучені через повітропровід з вентилятором [3].

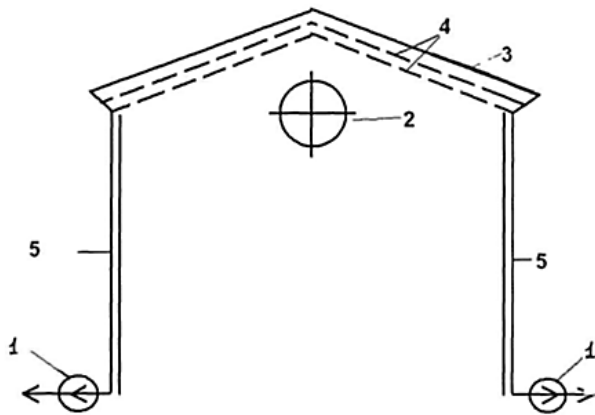


Рис. 1. Пристрій для променистого опалення:
1 – вентилятор, 2 – трубчастий лінійний нагрівач,
3 – суцільний шар зонта, 4 – шари зонта з перфорацією, 5 – повітропровід

Також є нагрівач, в якому конвективний тепловий потік використовується для нагрівання припливного повітря на потреби вентиляції приміщень [4], та нагрівач, в якому нагріте повітря служить засобом підвищення випромінювальної здатності пристрою [5].

Постановка завдання. Мета роботи – розробити математичну модель для розрахунку гідравлічних і теплових режимів нового технічного рішення трубчастого газового нагрівача, розташованого у горизонтальному каналі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розроблено технічне рішення трубчастого газового нагрівача, розташованого у горизонтальному каналі (рис. 2).

Трубчастий нагрівач, розташований у горизонтальному каналі, являє собою пристрій, розташований нижче нульової позначки землі, який генерує теплоту, транспортує її вздовж внутрішньої поверхні нагрівальної труби (внутрішнього простору нагрівача), через стінку якої нагрівається зовнішнє повітря, що забирається у зовнішній простір нагрівача (навколо нагрівальної труби) через спеціальний вертикальний канал.

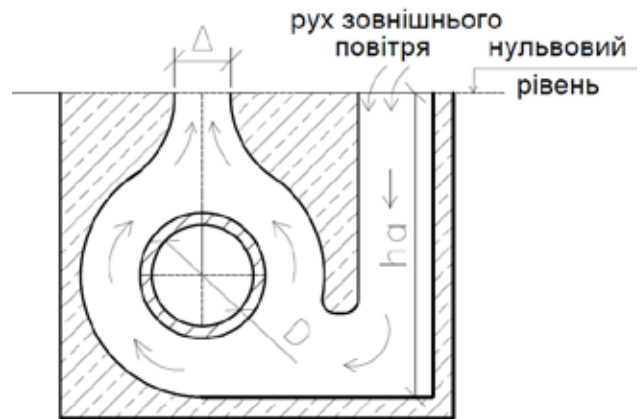


Рис. 2. Схема трубчастого газового нагрівача, розташованого у горизонтальному каналі:
D – діаметр труби трубчастого нагрівача,
 h_d – висота підйому повітря, яке нагрівається в середині каналу, Δ – ширина вихідного отвору для нагрітого повітря в каналі

Рух зовнішнього повітря зумовлений природною тягою, яку забезпечує конструкція нагрівача, без допомоги тягодуттєвих пристроїв, що підвищує енергоефективність та безпечність технічного рішення. Нагріте повітря подається вузьконаправленим потоком через отвір на рівні нульової позначки землі, що характеризується величиною Δ (рис. 2).

Таким чином, конструкція трубчастого газового нагрівача, розташованого у підземному горизонтальному каналі, зводить до мінімуму використання променистого складника теплообміну та призначена переважно для нагрівання зовнішнього повітря і подальшого використання його у вигляді вузьконаправленого конвективного теплового потоку.

Розроблено математичну модель трубчастого газового нагрівача, розташованого у підземному горизонтальному каналі. Характерною особливістю математичної моделі нагрівача, розташованого у підземному горизонтальному каналі, є наявність взаємного зв'язку теплового та гідравлічного режимів газової частини нагрівача (процесу 1) з режимом підігріву зовнішнього повітря – повітряною частиною (процес 2). З урахуванням цього факту модель являє собою гідравлічний ланцюг з розподіленими та регульованими параметрами.

Математична модель процесу 1 нагрівача, розташованого у підземному горизонтальному каналі, розроблена на основі математичної моделі трубчастого нагрівача підвищеного випромінювання [6]. У процесі 2 розглядається природний

рух припливного повітря у зовнішньому просторі вздовж нагрівача, з нагріванням повітря та подачею його назовні через вузький вертикальний отвір на рівні нульової позначки землі. Для процесу 2 (повітряна частина) було складено групу рівнянь теплообміну та гідравліки:

$$M = \rho w F = \text{const} \quad (1)$$

$$p = \rho R T \quad (2)$$

$$dp = -\Lambda \cdot dx/D \cdot \rho \frac{w^2}{2} + dh(\rho_a - \rho)g \quad (3)$$

$$dQ_{\text{ІК}} = \pi D dx a_1(T - T_{wi}) \quad (4)$$

$$dQ_{\text{ІП}} = \pi D dx c_0 \varepsilon (T^4 - T_{wi}^4) 10^{(-8)} \quad (5)$$

$$dQ_2 = \pi D dx \frac{\lambda}{\delta} (T_{wi} - T_{wo}) \quad (6)$$

$$dQ_3 = \pi D dx c_0 \varepsilon_w (T_{wo}^4 - T_o^4) 10^{(-8)} \quad (7)$$

$$dQ_4 = \pi D dx a_2(T_{wo} - T_o) \quad (8)$$

$$dQ_1 = dQ_{\text{ІК}} + dQ_{\text{ІП}} \quad (9)$$

$$d(\rho w F c_p T) = -dQ_1 \quad (10)$$

$$dQ_1 = dQ_2 \quad (11)$$

$$dQ_2 = dQ_3 + dQ_4 \quad (12)$$

де ρ, ρ_a – щільність газоповітряної суміші у нагрівачі та повітря у навколишньому середовищі, кг/м^3 ; w – середня лінійна швидкість руху газоповітряної суміші по випромінюючій трубі, м/с ; F – площа поперечного перетину труби, м^2 ; p, T – абсолютні тиск та температура газоповітряної суміші у такому перетині випромінюючої труби, Па, К ; R – газова постійна, Дж/(кг К) ; dp – перепад тиску у разі течії газоповітряної суміші у випромінюючій трубі на ділянці довжиною dx ; Λ – коефіцієнт тертя; D – внутрішній діаметр труби, м ; dQ_1 – тепловий потік від газоповітряної суміші до стінки випромінюючої труби, переданий конвекцією, Вт ; a_1 – коефіцієнт тепловіддачі від потоку газоповітряної суміші до стінки труби, $\text{Вт/м}^2 \text{ К}$; T_{wi} – температура внутрішньої поверхні стінки труби у такому перетині; dQ_2 – тепловий потік від внутрішньої поверхні стінки випромінюючої труби до зовнішньої поверхні, переданий теплопровідністю, Вт ; λ, δ, T_{wo} – відповідно коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/м К ; товщина, м та температура зовнішньої поверхні стінки випромінюючої труби, К ; dQ_3, dQ_4 – теплові потоки випромінюванням і конвекцією від поверхні випромінюючої труби в навколишнє середовище відповідно, Вт ; c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, ε_g – ступінь чорноти матеріалу каналу, c_p – теплоємність за постій-

ного тиску газоповітряної суміші, dQ_0 – тепловий потік, що надходить у газоповітряну суміш під час згоряння горючого газу, dh – елементарна ділянка підйому трубчастого нагрівача.

Маємо залежність $h=h(x)$ – відома функція по довжині нагрівача. Тоді $dh = h'(x)dx$. У разі горизонтального розташування нагрівача маємо $dh = 0$.

Розроблений загальний підхід для використання моделі (1)–(12) під час розрахунку теплового та гідравлічного режиму нагрівачів [3]. Система рівнянь теплообміну (4)–(12) замкнена, але нелінійна. За допомогою чисельного методу вирішується система рівнянь (4)–(12) і знаходяться $dQ_1, dQ_2, dQ_3, dQ_4, T_{wi}, T_{wo}$. Після перетворень системи (1)–(12) отримаємо вирази для диференціалів:

$$dp = -\Lambda \cdot dx/D \cdot \rho \frac{w^2}{2} + dh(\rho_a - \rho)g \quad (13)$$

$$d\rho = (dp - \rho R dt)/(RT) \quad (14)$$

$$dw = (-w F dp - \rho w dF)/(\rho F). \quad (15)$$

Ці вирази можна використовувати для чисельного інтегрування під час розрахунків теплового та гідравлічного режимів розроблених нагрівачів без урахування каналу, в якому розташований нагрівач.

Якщо ми маємо горизонтальний канал, в якому розташований трубчастий нагрівач, то математичну модель трубчастого газового нагрівача слід доповнити математичною моделлю теплообміну та гідравліки для повітряного середовища між трубчастим газовим нагрівачем та стінками каналу. Цей додатковий блок рівнянь математичної моделі має вигляд:

$$\rho_a w_a F_a = M_a \quad (16)$$

$$(\rho_0 - \rho_a)gh_a = \rho_a w_a^2 / 2 \quad (17)$$

$$dQ_a = a_2(T_{we} - T_a) = c_p \rho_a w_a F_a (T_a - T_0), \quad (18)$$

де індексом a позначені параметри, що відносяться до повітря, яке нагрівається трубчастим нагрівачем і виходить до зовнішнього простору, а індексом 0 позначені параметри, що відносяться до повітря навколишнього середовища.

Рівняння (1)–(12) та (16)–(17) сукупно дають замкнуту математичну модель трубчастого газового нагрівача, розташованого у горизонтальному каналі.

Чисельне вирішення сукупності диференціальних рівнянь розробленої математичної моделі дадуть змогу розраховувати параметри гідравлічного та теплового режиму трубчастого газового

нагрівача, який розташований нижче нульового рівня у горизонтальному каналі.

Висновки. Розроблено технічні рішення трубчастого газового нагрівача, розташованого у горизонтальному каналі, конструкція якого зводить до мінімуму використання променистого складника теплообміну та призначена переважно для нагрівання зовнішнього повітря і подальшого використання його у вигляді вузьконаправленого конвективного теплового

потoku. Розроблено математичну модель трубчастого газового нагрівача, розташованого у підземному горизонтальному каналі, характерною особливістю якої є наявність взаємного зв'язку теплового та гідравлічного режимів газової частини нагрівача з режимом підігріву зовнішнього повітря – повітряною частиною. З урахуванням цього факту модель являє собою гідравлічний ланцюг з розподіленими та регульованими параметрами.

Список літератури:

1. Иродов В.Ф., Хацкевич Ю.В., Черногорец Г.Я. Развитие технических решений теплоснабжения с трубчастыми газовыми нагревателями. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури* : зб. наук. пр. Придніпров. держ. акад. буд-ва та архітектури. Дніпро, 2017. Вип. 5. С. 233–234.
2. Дудкин К.В., Ткачева В.В., Иродов В.Ф. Трубчатые газовые нагреватели для теплоснабжения в сельской местности. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 156 с.
3. Газовий трубчастий променистий нагрівач: пат. 87028 Україна: МПК F24D 10/00; заявл. 25.02.2009; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 11.
4. Осетянская Д.Е. (Шаптала Д.Е.) Экспериментальные исследования режимов работы трубчатого нагревателя с распределённой организованной подачей приточного воздуха. Gdańsk: Wydawca: Sp. z o.o. "Diamond trading tour", 2012. 88 str. С. 18–25.
5. Осетянська Д.Є. (Шаптала Д.Є.) Підвищення ефективності газових трубчастих нагрівачів для променевого опалення. *Технологічний аудит і резерви виробництва* : матеріали науково-практичної конференції "Наукові підсумки 2012 р.", Т. 1. Харків : ПП «Технологічний Центр», 2012. С. 31–32.
6. Иродов В.Ф., Осетянская (Шаптала) Д.Е. Моделирование трубчатого газового нагревателя повышенного лучеиспускания. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури* : зб. наук. пр. Придніпров. держ. акад. буд-ва та архітектури. Дніпро, 2012. Вип. 6. С. 10–14.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРУБЧАТОГО ГАЗОВОГО НАГРЕВАТЕЛЯ, РАСПОЛОЖЕННОГО В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ

Одним из путей повышения эффективности работы систем теплоснабжения является использование трубчатых газовых нагревателей, которые являются автономными, высокоэффективными и многофункциональными системами. Разработано техническое решение трубчатого газового нагревателя, расположенного в горизонтальном канале, конструкция которого сводит к минимуму использование лучистой составляющей теплообмена и предназначена преимущественно для нагревания наружного воздуха и дальнейшего использования его в виде узконаправленного конвективного теплового потока. Разработана математическая модель трубчатого газового нагревателя, расположенного в подземном горизонтальном канале, характерной особенностью которой является наличие взаимной связи теплового и гидравлического режимов газовой части нагревателя с режимом подогрева наружного воздуха – воздушной частью. С учётом этого факта модель представляет собой гидравлическую цепь с распределёнными и регулируемым параметрами.

Ключевые слова: математическое моделирование, трубчатый газовый нагреватель, подземный горизонтальный канал, нагретый воздух, узконаправленный конвективный тепловой поток.

MATHEMATICAL MODELING OF A TUBULAR GAS HEATER LOCATED IN A HORIZONTAL CHANNEL

One of the ways to improve the efficiency of heating systems is the use of tubular gas heaters, which are autonomous, highly efficient and multifunctional systems. A technical solution has been developed for a tubular gas heater located in a horizontal channel. The heater design minimizes the use of the radiant component of heat transfer. The heater is primarily intended for heating outside air and its further use in the form of a narrowly directed convective heat flow. A mathematical model of a tubular gas heater located in an underground horizontal channel has been developed. A characteristic feature of the model is the existence of a mutual connection between the thermal and hydraulic modes of the gas part of the heater and the mode of heating the outside air – the air part. Given this fact, the model is a hydraulic circuit with distributed and adjustable parameters.

Key words: mathematical modeling, tubular gas heater, underground horizontal channel, heated air, narrow convection heat flow.