

УДК 697.7 – 027.45

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ТРУБЧАСТИМИ ГАЗОВИМИ НАГРІВАЧАМИ

В. В. Ткачова, к. т. н., доц.

Ключові слова: *трубчасті газові нагрівачі, надійність, режимна керованість, метод оцінки, критерій надійності*

Постановка проблеми. В умовах зростаючої дорожнечі енергоресурсів, ненадійної роботи наявних систем теплопостачання, значних капітальних витрат на реконструкцію старих систем опалення або придбання і монтаж нових систем повітряно-водяного опалення особливо актуальне застосування енергозберігальних технологій та альтернативного опалювального обладнання. Світова практика показує і доводить ефективність застосування децентралізованих систем теплопостачання. І вже накопичено достатній досвід у їх застосуванні, в тому числі і систем газового променевого опалення.

Питання надійності систем теплопостачання з газовими трубчастими нагрівачами особливо актуальне в теперішній час. Аналіз і керування надійністю таких систем є одним із найважливіших у проектуванні та експлуатації.

Аналіз існуючих рішень. У 2002 році в Державних будівельних нормах «Газопостачання» [1] з'явився термін «інфрачервоні трубчасті газові обігрівачі № (ІТГО). Це обладнання було охарактеризоване в загальних рисах. Інших загальнодержавних стандартів не було і зараз немає. Також у цьому році починається виробництво автоматичного газового пальника ДВМ-25 м в комплекті з трубами для променевого опалення у відповідності з ТУ·У·29,2 – 13440098 – 001 – 2002. З 2007 року виробляються нагрівачі газові трубчасті «Селект» у трьох модифікаціях: для променевого опалення й обігріву, повітряного опалення й обігріву, нагріву води.

Сьогодні в Росії також експлуатують понад сто великих і середніх комплексів та об'єктів, теплопостачання яких здійснюють газові обігрівачі. На російському ринку представлена велика кількість як вітчизняних, так і зарубіжних газових обігрівачів. Пальники ІТГО сертифіковані в Держстандарті Російської Федерації (ГОСТР) і виробляються відповідно [2].

Подібні обігрівачі широко використовують у країнах Європи, США та Канаді. У Великобританії виробництвом і розробкою ІТГО займаються понад 40 років. На сьогодні системи «Space – Ray» обігрівачі тисячі будівель від Аляски до Австралії.

Американська компанія «Roberts Gordon» існує з 1923 року і виробляє інфрачервоні обігрівачі низької інтенсивності, що працюють на природному газі широкого спектра потужності для різних будівель і споруд. Сьогодні «Roberts Gordon» експортує свою продукцію у 38 країн світу [3].

Метою статті є оцінка рівня надійності систем теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами і забезпечення її підвищення для економії капітальних витрат на обладнання і економії експлуатаційних витрат на паливно-енергетичні ресурси.

Виклад. Згідно з [4], подія – це всякий факт, який у результаті досвіду може статися або не статися.

З позиції надійності виділяються події, що спричинюють до зниження рівня працездатності (відмови працездатності), до зниження рівня функціонування (відмови функціонування), а також події, що викликає обмеження наслідків відмов і підвищення рівня працездатності або рівня функціонування (локалізація відмови функціонування, відновлення) [5]. У цьому випадку поняття «аварія» може бути віднесене як до першої, так і до другої групи подій (рис. 1).

Таким чином, випадкові події, які характеризують надійність – це «відмова працездатності» і «відмова функціонування».

Аварії та відмови СТП з ТГН можуть використовувати такі причини: знос устаткування; помилки проектування; недоліки конструкції устаткування; заводські дефекти; недоліки вузлів і деталей, нагрівачів; дефекти будівництва, монтажу і наладки; дефекти проведення ремонтних робіт; невідповідність умов роботи устаткування проектним (розрахунковим) режимам тощо.

Відмова працездатності для СТП з ТГН пов'язана з можливою поломкою окремих елементів ТГН або елементів системи газопостачання. Наприклад: поломка газового пальника, витяжного вентилятора, автоматики безпеки тощо.



Рис. 1. Класифікація подій, що характеризують надійність системи тепlopостачання із трубчастими газовими нагрівачами

Відмова функціонування для цих систем пов'язана з можливим переходом з одного рівня функціонування на інший, більш низький. Ця подія може бути пов'язана з відмовою працездатності, а може бути і не пов'язана з такою.

Відмова функціонування може виникати за рахунок: відмови працездатності, зміни зовнішніх умов, керування системою за змінних умов, неправильних рішень (керування довгострокове). Наприклад: у вихідні дні система тепlopостачання приміщення цеху була включена не на повну потужність, температура повітря знизилась, тому в перший робочий день цех виявився не прогрітим. Таким чином вийшов недолік функціонування, не пов'язаний з відмовою працездатності.

Відмова працездатності і відмова функціонування можуть бути *повними* і *частковими*. Повна відмова функціонування переводить систему з повністю або частково робочого стану в непрацездатний. Аналогічно повна відмова функціонування спричинює до перехід системи з повністю або частково робочого стану в неробочий. При частковій відмові працездатності виникає або перехід повністю працездатного об'єкта у стан часткової працездатності або подальше зниження рівня працездатності частково працездатного об'єкта. Часткова відмова функціонування викликає або перехід об'єкта з повністю робочого стану в частково робоче, або подальше зниження відносного рівня функціонування об'єкта, що перебував в частково робочому стані. Часткові відмови (як працездатності, так і функціонування) СТП з ТГН можуть бути пов'язані з відмовами або виводами з роботи для проведення запобіжних ремонтів окремих елементів. Наприклад: зламався регулятор температури, газовий клапан тощо.

Раптові або *поступові* відмови працездатності і функціонування СТП з ТГН характеризуються відповідно раптовим або поступовим зниженням рівня працездатності або рівня функціонування.

Незалежною може бути відмова працездатності (функціонування), якщо вона не зумовлена відмовами інших елементів системи, в іншому випадку відмова буде *залежною*. Наприклад: перебіг у подачі газу може спричинити нестабільність полум'я, в результаті чого спрацьовує іонізаційний датчик контролю полум'я й автоматика системи відключає нагрівач.

Стойкі і *нестійкі* відмови працездатності (функціонування) виділяються у зв'язку з можливістю поновлення об'єктів. Прикладом такої відмови може бути відключення системи автоматики внаслідок порушення тяги з причини сильного поривчастого вітру, яка зробить спробу знову перезапуститись. Якщо в цей момент знову налетить поривчастий вітер і порушить тягу, то система автоматики знову не спрацює (стійка відмова), в іншому випадку, коли система автоматики нормально перезапустилась (нестійка відмова). Тому відмова буде називатися стійкою, якщо для поновлення працездатності (функціонування) потрібно проведення ремонту, або нестійкою, якщо для поновлення працездатності (функціонування) достатньо змінити режим його роботи без проведення ремонту.

До групи відмови функціонування, окрім розглянутих, входять також *відмова спрацьовування, надмірне спрацьовування і помилкове спрацьовування*. Ці поняття характеризують відмови функціонування об'єктів дискретної дії, наприклад систем автоматики: не відбулося розпалювання, не відкрився газовий клапан. Факт виконання цієї функції називається спрацьовуванням, а невиконання – відмовою спрацьовування. *Надмірне спрацьовування* полягає у спрацьовуванні об'єкта за вимоги спрацьовування інших об'єктів і відсутності вимоги спрацьовування даного об'єкта. Наприклад, у системі працює декілька пальників, один з яких був вимкнений системою автоматики, після чого відключилась уся система.

Помилкове спрацьовування полягає у спрацьовуванні об'єкта за відсутності вимоги спрацьовування цього та інших об'єктів. Наприклад, система контролю полум'я має вимогу: датчик контролю полум'я не повинен спрацьовувати за наявності помилкового сигналу, але можуть виникати випадки, коли порушення потенціалів у системі у разі пошкодження ізоляції викликає помилкове спрацьовування датчика.

Рішення про наявність або відсутність відмов щодо різних рівнів працездатності та функціонування приймаються на підставі критеріїв відмов, які повинні спеціально встановлюватися із функціонального призначення системи та особливостей її споживачів. Формулювання критеріїв відмови залежить від виконуваних звань.

Далі будемо розглядати надійність як властивість виконувати задані функції в заданому обсязі за певних умов функціонування. Сьогодні існують сотні визначень цього терміна, що пояснюють ті або інші його сторони.

Методологія дослідження надійності СТП з ТГН передбачає вивчення таких важливих одиничних властивостей як *безвідмовність, режимна керованість і безпека*.

Режимна керованість систем теплопостачання, згідно з [4; 5] – це властивість системи підтримувати або переходити в потрібний режим за допомогою керування.

На разі не існує усталених уявлень про те, яким способом оцінювати режимну керованість СТП з ТГН. Викладені математичні методи корисні для розв'язання багатьох розрахункових задач, які виникають під час дослідження надійності систем енергетики, але частина цих методів не дозволить оцінити рівень надійності СТП з ТГН. Разом із тим можемо відзначити праці, результати яких можуть бути застосовані для оцінки режимної керованості СТП з ТГН [6 – 9]. Праці [8; 9] базуються на розрахунку та керуванні тепловим режимом приміщень.

Виникає необхідність уводити нові критерії режимної керованості. Це зумовлює розробку спеціальних математичних моделей і спеціальних методів їх дослідження.

Метод оцінки режимної керованості СТП з ТГН був розроблений на основі існуючих моделей і у стислому вигляді викладений у [10]. Цей метод викладається більш детально в данній статті.

Розглянемо ряд елементарних подій ω_i $\Omega = \bigcup \omega_i$, де i – порядковий номер події.

Запропонований комплекс режимної керованості k – *теплове недопостачання* :

$$k = \sum_i \frac{Q_i^R - \Delta Q_i}{Q_i^R} \times \tau_i, \quad (13)$$

$$Q_i^R = Q_{hi}^R + Q_{vi}^R,$$

$$Q_{hi}^R = Q_{hi}^R \left(\overset{ext}{\curvearrowright} \right),$$

$$Q_{vi}^R = Q_{vi}^R \left(\overset{ext}{\curvearrowright} \right),$$

$$\Delta Q_i = Q_{hi}^R + Q_{vi}^R - Q_{hi} - Q_{vi} \text{ або } \Delta Q_i = 0,$$

де: Q_i^R – необхідна теплова потужність при настанні події i ;

Q_{hi}^R, Q_{vi}^R – необхідна потужність для опалення і вентиляції відповідно;

t_i^{ext} – зовнішня температура при настанні події i ;

Q_{hi}, Q_{vi} – фактична потужність для опалення і вентиляції відповідно;

ΔQ_i – теплове недопостачання при настанні події i .

Була отримана математична модель гідравлічного та теплового режимів для розрахунку величин Q_{hi}, Q_{vi} . Задача розрахунку теплового та гідравлічного режиму при проектуванні нагрівача була сформульована в [11].

Математична модель теплового і гідравлічного режимів наведена у вигляді системи рівнянь теплообміну і рівнянь руху теплоносія.

Рівняння теплообміну:

$$dQ_{1K} = pDdx\partial_1(T - T_{wi}); \quad (14)$$

$$dQ_{1П} = pDdxc_0 e (T_{wo}^4 - T_o^4) 10^{(8)}; \quad (15)$$

$$dQ_2 = pDdx \frac{\lambda}{\delta} (T_{wi} - T_{wo}); \quad (16)$$

$$dQ_3 = pDdxc_0 e (T_{wo}^4 - T_o^4) 10^{(8)}; \quad (17)$$

$$dQ_4 = pDdx\partial_2(T_{wo} - T_o); \quad (18)$$

$$dQ_1 = dQ_{1K} + dQ_{1П}; \quad (19)$$

$$d(c w F c_p T) = -dQ_1; \quad (20)$$

$$dQ_1 = dQ_2; \quad (21)$$

$$dQ_2 = dQ_3 + dQ_4; \quad (22)$$

Рівняння руху:

$$M = c w F = const; \quad (23)$$

$$P = c R T; \quad (24)$$

$$dP = -\Lambda \cdot dx / D \cdot c \frac{w^2}{2} + dh^*(\rho_a - \rho) \cdot g, \quad (25)$$

де $h = h(x)$ – відома функція.

Тоді $dh = h'(x) \cdot dx$, де $h'(x)$ – відома похідна.

Система рівнянь (14) – (25) являє собою математичну модель нагрівача, починаючи від перетину повного згоряння пального газу до витяжного вентилятора. Це система звичайних диференціальних рівнянь. Початковими умовами для даної системи будуть значення основних параметрів у перетині повного згоряння пального газу, тобто значення $w, p, \rho, T, T_{wi}, T_{wo}$. Інші параметри в даному перетині можна легко розрахувати.

Перераховані рівняння математичної моделі повинні бути доповнені природною умовою для сумарних втрат тиску в нагрівачі, яка по суті є рівнянням другого закону Кірхгофа для нагрівачів як гідравлічного ланцюга. Це рівняння можна записати у вигляді:

$$\int dp(x) dx + \sum_i \Delta P_i - \Delta P_a = 0, \quad (26)$$

де під інтегралом – втрати тиску на тертя по шляху руху газоповітряної суміші в нагрівачі, $\sum_i \Delta P_i$ – сума втрат тиску в місцевих опорах по шляху руху газоповітряної суміші, враховуючи втрату тиску повітря в газопальниковому блоці від входу повітря до зрізу газового сопла.

Висновки. Наведено класифікацію подій, що характеризують надійність системи теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами. Запропоновано критерій надійності для режимної керованості. Викладено метод та математичну модель його розрахунку.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. ДБН. В 2.5 – 20 – 2001. Газопостачання. – К. : Держбуд України, 2001. – 286 с.
2. ГОСТ Р 54446 – 2011. Нагреватели светового излучения газовые, не предназначенные для бытового применения. Ч. 1. Требования безопасности (ЕН 419 – 1:2009, MOD).
3. **Sir Wm HERSCHEL.** Infrared Handbook / Concepts of Radiant Heating. Roberts Gordon, 1994. – P. 17 – 35.

4. Надежность систем энергетики. Терминология : сб. рекомендуемых терминов. – М. : Наука, 1980. – Вып. 95. – 44 с.
5. Руденко Ю. Н. Надежность систем энергетики / Ю. Н. Руденко, И. А. Ушаков // М. : Наука, 1989. – 325 с.
6. Иродов В. Ф. Математическое моделирование элементарного участка системы воздушно-лучистого отопления / Л. В. Солод., А. В. Кобыща // Вісник Придніпр. держ. акад. будівниц. та архітект. – Д. : ПДАБА, 2001. – № 4. – С. 41 – 46.
7. Иродов Вячеслав. Расчет температурных удлинений инфракрасного трубчатого газового обогревателя / Валерия Ткачева, Леонтина Солод // Theoretical Foundations of Civil Engineering. – 2011. – V. 19. – P. 381 – 386.
8. Хацкевич Ю. В. Разработка алгоритма оперативного управления системами воздушно-лучистого отопления на газовом топливе / Ю. В. Хацкевич // Сб. науч. тр. НГУ. – 2006. – № 26. – Т. 2 – С. 15 – 22.
9. Болотских Н. Н. Совершенствование методики расчета систем отопления газовыми трубчатыми инфракрасными нагревателями. // Наук. вісник будівництва : ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – 2009. – Вип. 54. – С. 76 – 91.
10. Tkachova Valeriya. Controllability estimation for heating systems with infrares tube heaters // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – Ч. 1. – № 5/1(7). – С. 31 – 32.
11. Дудкин К. Расчет теплового и гидравлического режима при проектировании многоконтурных трубчатых газовых нагревателей / К. Дудкин, В. Ткачева, В. Данишевский // Theoretical Foundations of Civil Engineering, Polish – Ukrainian transactions. Vol. 20. – Warsaw : Warsaw University of Technology, 2013. – P. 531 – 536.

УДК 624.154:624.151

О ДОСТОВЕРНОСТИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ РОСТВЕРКА СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА С ОСНОВАНИЕМ

А. Н. Моторный, маг., с. н. с., Н. А. Моторный, к. т. н., доц.

Ключевые слова: забивная свая, буронабивная свая, буроналивная свая, межсвайное пространство, межскважинное пространство, контакт подошвы ростверка с основанием

Введение. При анализе работы свай в делювиальных и аллювиально-делювиальных глинистых грунтах, а также в слабых водонасыщенных глинистых грунтах часто даются «рациональные» предложения об учёте или возможном учёте работы ростверка свайного фундамента с основанием. Это частично повышает несущую способность свайного фундамента, в целом достигается снижение материалоемкости и стоимости работ нулевого цикла. В этом варианте предлагается следующая схема учёта дополнительной несущей способности свайного фундамента за счёт включения в работу ростверка.

а) Свайный фундамент по несущей способности разделяется на два блока:

Первый блок – несущая способность куста свай равная

$$N_c = n \cdot F_d \quad (1)$$

где: n – количество свай в кусте;

F_d – несущая способность одиночных свай вычисленных согласно ДБН.В 2.1-10-2009. Зміна 1, по предлагаемым формулам или по данным статических испытаний свай.

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{cr} \cdot R \cdot A + U \sum \gamma_{cf} f_i \cdot h_i) \kappa H \quad (2)$$

или $F_d : S = \xi \cdot S_{u,mb} \kappa H$

где: γ_c – коэффициент условий работы свай в грунте, принимается равным =1;

R – расчётное сопротивление грунта под нижним концом свай, кПа; (табл. Н.2.1 ДБН).

$A_{св}$ – площадь поперечного сечения ствола сваи в месте опирания его на грунт основания, м²;

U – наружный периметр поперечного сечения ствола сваи, м;

f_i – расчётное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности свай, кПа; (принимается по таблице Н.2.1 ДБН В 2.1-10-2009, зміна 1).

h_i – толщина i -го слоя грунта соприкасающегося с боковой поверхностью свай, м;