

НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ТРУБЧАСТИМИ ГАЗОВИМИ НАГРІВАЧАМИ

В. В. Ткачова, к. т. н., доц.

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

Постановка проблеми. Основними напрямками економічного і соціального розвитку починаючи з 1986 і на період до 2000 року було передбачено підвищення забезпеченості населених міст централізованим теплопостачанням за рахунок спорудження потужних джерел теплоти.

Надійність систем енергетики – це, за працями Ю. М. Руденко, – комплексна властивість, що складається з одиничних властивостей – безвідмовності, режимної керованості, довговічності, безпеки та інших. Одиничні властивості надійності децентралізованих систем теплопостачання практично не досліджувалися, тому цей напрям наукової роботи актуальний як у науковому, так і в практичному значенні.

Аналіз публікацій. Дослідження надійності систем теплопостачання з використанням методів теорії надійності почали розвиватися у кінці 1960 – початку 1970-х років. Загальні принципи розрахунку і резервування теплових мереж сформулювали в 1972 році В. Я. Хасилев і М. К. Такайшвілі. Пізніше цей підхід почав розвиватися в роботах Сибірського енергетичного інституту (зараз Інститут систем енергетики ім. Л. А. Мелентьєва).

Завдяки роботам проф. М. Я. Розкіна та його послідовників напрям дослідження надійності систем теплогазопостачання почав розвиватися на кафедрі теплотехніки і газопостачання Дніпропетровського інженерно-будівельного інституту (нині ДВНЗ ПДАБА) починаючи з кінця 1970-х років.

Одиничні властивості водяних систем теплопостачання досліджені у працях О. О. Іоніна, А. П. Меренкова, О. В. Сенової, В. Г. Сідлера та інших авторів.

Загальнотеоретичні методи забезпечення надійності технічних систем, спеціальні прийоми, які можуть бути ефективно використані в системах енергетики, викладає Ю. М. Руденко в [1].

На основі багаторічного досвіду і знань, накопичених у процесі досліджень проблеми надійності систем енергетики різного типу, в довіднику [2] описані методи і математичні моделі, необхідні для формування рішень з розвитку та експлуатації електроенергетичних, газо-, нафто- і теплопостачальних систем.

Велику увагу до проблеми надійності теплопостачання приділяв О. О. Іонін В його монографії [3] розглянуто проблеми та основні поняття надійності теплопостачання, загальна постановка розрахунку надійності централізованих систем теплопостачання, принципи проектування і розрахунку надійних систем теплових мереж, методика розрахунку надійності резервованих і нерезервованих теплових мереж.

Мета статті. Системи теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами одночасно можуть бути джерелами теплопостачання і опалювальними приладами. Забезпечення надійності цих систем – одна з найважливіших вимог, що пред'являються до них як на стадії проектування, так і в процесі експлуатації.

Виникає запитання: чи можна всі науково-методичні здобутки з надійності великих систем енергетики перенести на дослідження автономних систем теплопостачання, систем теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами? У статті дається відповідь.

Виклад матеріалу. На рисунку 1 наведено принципову схему лінійного трубчастого нагрівача. *Трубчастий газовий інфрачервоний нагрівач* – це різновид теплового обладнання, який застосовується для нагріву предметів і обігріву приміщень за допомогою інфрачервоного випромінювання. Якщо мова йде про декілька нагрівачів, установлених в одному приміщенні, їх називають «Інфрачервоні системи» (рис. 2.). Нагрівачі працюють на основі згоряння повітряно-газової суміші всередині випромінювальної труби, що призводить до її нагрівання до температури 400 С. Тепло виходить від джерела та обігріває безпосередньо предмети, що перебувають у зоні дії випромінювання.

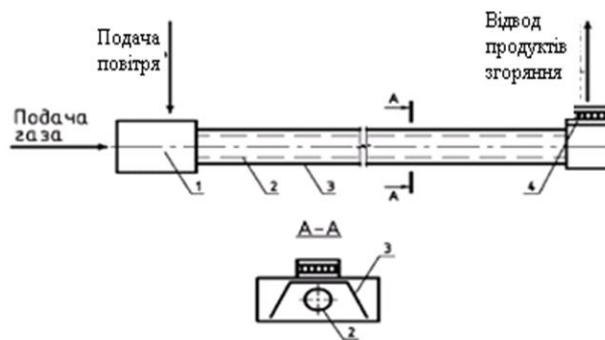


Рис. 1. Принципова схема лінійного трубчастого газового нагрівача:
 1 – пальник; 2 – труба-випромінювач; 3 – відбивач теплового випромінювання;
 4 – блок відведення продуктів згоряння

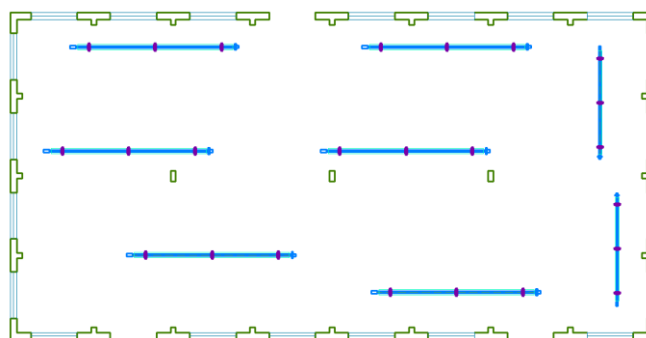


Рис. 2. Схема системи теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами

Згідно з [4], надійність – це властивість об'єкта виконувати задані функції в заданому обсязі за певних умов функціонування.

Спочатку проаналізуємо стани, згідно з класифікацією [1], що характеризують надійність систем теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами, далі для стислості будемо називати їх загальним терміном – «надійність СТП з ТГН».

Стани СТП з ТГН можна класифікувати з точки зору надійності:

- *можливістю виконувати задані функції в заданому обсязі і виконання ними заданих функцій в заданому обсязі* (рис. 3).

Для СТП з ТГН характерні такі стани, які характеризуються відповідними рівнями робоздатності: повністю *працездатний стан*, *частково працездатний стан* (складають у сукупності робоздатний стан), *непрацездатний стан* і *граничний стан* (відповідає випадку, коли усунути неприпустиме зниження рівня робоздатності виявляється неможливим). СТП з ТГН довести до граничного стану практично неможливо.

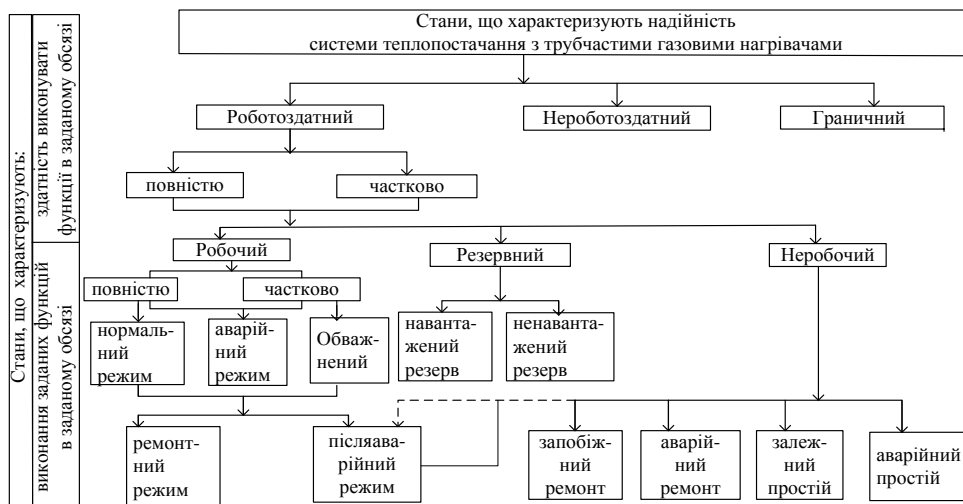


Рис. 3. Класифікація станів системи теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами

Стани іншого випадку характеризуються різними відносними рівнями функціонування: повністю робочий стан, частково робочий стан (складають у сукупності робочий стан), резервний і неробочий стан. Повністю працездатний стан СТП з ТГН відповідає повністю робочому стану, а частково працездатний стан – частково робочому. Проте в повністю робочому стані може перебувати і частково працездатна система, якщо вона функціонує в умовах, які характеризуються зниженими вимогами до її працездатності, порівнянно з тими, на які вона розрахована. Наприклад, СТП з ТГН унаслідок непередбаченої зношеності підшипників вентилятора перебуває в частково працездатному стані і повністю виконує свої функції.

Робочий стан характеризується режимами роботи СТП з ТГН. При цьому нормальний режим завжди відповідає повністю робочому, а обважнений – частково робочому стану. При нормальному режимі забезпечуються значення заданих параметрів режиму і резервування у встановлених межах.

Обважнений режим розрізняється тим, що він, незалежно від значення параметрів режиму, не забезпечує резервування у встановлених межах. Наприклад, обважнений режим може виникати у випадку, коли з чотирьох працюючих у системі нагрівачів один виходить із ладу, при цьому система перебуває у працездатному стані.

Крім нормального і обваженого, робочий стан нашої системи характеризується також такими поняттями як ремонтний, аварійний і післяаварійний.

Ремонтним називається такий режим системи, коли частина її елементів перебуває у стані запобіжного або аварійного ремонту.

У загальному випадку ремонтний режим може бути нормальним і обважненим. Наприклад, якщо один із нагрівачів системи може перебувати у стані запобіжного, а не аварійного ремонту, то ремонтний режим буде називатися нормальним, тому що цей нагрівач перебуватиме у стані, на який система розраховується.

Аварійний режим виникає зазвичай у результаті відмови частини елементів системи і триває до моменту локалізації відмови цих елементів і зумовлених ними відмов. Локалізація полягає зазвичай у виведенні з роботи відмовлених елементів і введенні в роботу елементів, які перебувають у резервному стані.

Післяаварійним вважається режим, у якому система знаходиться в результаті відмови частини її елементів після локалізації відмови до встановлення заданого (нормального або ускладненого) режиму роботи. Як правило, післяаварійний режим системи – ускладнений. Проте у ряді випадків післяаварійний режим може бути нормальним, якщо забезпечується підтримання заданих параметрів режиму роботи і ступеня резервування у встановлених межах. Післяаварійний режим може відповідати не тільки робочому, а й неробочому стану системи, якщо система не може виконати всіх заданих функцій після ремонту. Наприклад, автоматика СТП з ТГН відключила систему, тому що згорів вентилятор, унаслідок чого виникла потреба заміни цього елемента. Після усунення аварії знадобився ручний перезапуск системи, але

система знову не запустилась. Цей випадок, однак, рідкісний, і через це післяаварійний режим на рисунку 3, буде віднесений до робочого стану, а його зв'язок із неробочим станом показаний штриховою лінією.

Резервний стан об'єкта – це працездатний стан, у якому він здійснює функції резервування інших об'єктів. Стан навантаженого резерву характеризується тим, що об'єкт виконує функції резервування інших об'єктів і перебуває в роботі, а ненавантаженого – об'єкт виконує функції резервування інших об'єктів і не перебуває в роботі. Наприклад, роботу СТП з ТГН здійснюють шість нагрівачів, але за підвищення зовнішньої температури повітря один або два нагрівачі системи можуть бути відключені (ненавантажений резервний стан).

Неробочий стан СТП з ТГН поділяється на стани ремонту (запобіжного й аварійного) і простою (залежного й аварійного). В неробочому стані може перебувати як непрацездатна система, так і повністю або частково робоздатна. Останній випадок відповідає станам запобіжного ремонту (за умови, що у процесі ремонту працездатність об'єкта не порушується або порушується тільки частково) і залежного простою.

Стан запобіжного ремонту характеризується тим, що на об'єкті проводяться роботи з виявлення, попередження або усунення несправностей, що спричиняють його відмову.

У стані аварійного ремонту на об'єкті проводяться роботи з відновлення його працездатності, порушень у результаті відмови елементів системи. Стан аварійного простою відрізняється від попереднього тим, що на об'єкті не проводяться роботи з відновлення його працездатності. Стан залежного простою виникає внаслідок вимушеного відключення інших елементів системи або проведення на ній робіт, що потребують відключення системи. Наприклад, прогар, що виникає в лінійній частині труби одного з нагрівачів, потребує відключення всієї системи тепlopостачання.

Перехід СТП з ТГН з одного стану в інший може відбуватися в результаті відмов (аварій), відновлювальних операцій та зміни режиму її роботи.

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

Безвідмовність – властивість об'єкта безупинно зберігати працездатність протягом деякого часу або деякого напрацювання.

У процесі експлуатації корпус пальника зазнає значних теплових впливів. Великі перепади температур викликають появу теплових напруг, які можуть спричинювати прогари, механічні руйнування лінійної частини нагрівача за рахунок термічної деформації. Від цих відмов залежить працездатність нагрівача. Безвідмовність системи електропостачання і газопостачання СТП з ТГН відносять до надійності великих систем енергетики, і в цій статті не розглядаються.

Критерій надійності – це кількісний вираз, що характеризує надійність об'єкта.

Пропонується за показник безвідмовності прийняти температурну напругу $[\sigma]$. За допомогою цього критерію ми зможемо досліджувати напружено-деформований стан корпуса нагрівача і оцінювати його міцність під час проектування і в процесі експлуатації.

Під час роботи трубчаста частина нагрівача значно нагрівається (температура зовнішньої поверхні труби може досягати 450 – 650 °С). Для правильного розміщення і вибору кріплень під час проектування нагрівачів необхідно враховувати зміну довжини труби внаслідок теплового розширення матеріалу у разі зміни температури. Проектування і монтаж нагрівачів необхідно виконувати так, щоб труба могла вільно рухатися в межах величини розрахункового розширення. У праці [5] виконано розрахунок температурного переміщення труби і побудовано математичну модель, у [6] досліджувався напружено-деформований стан нагрівача. Процес розв'язання задачі поділявся на два етапи: визначення температурного поля і обчислення механічних деформацій і напруг.

На рисунку 4 наведено лінійну частину нагрівача в циліндричних координатах.

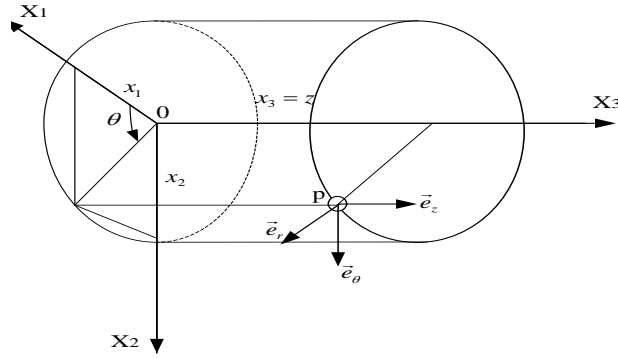


Рис. 4. Корпус нагрівача в циліндричних координатах

У циліндричних координатах положення точки P визначається координатами: r, θ, z (рис. 4). Координатними поверхнями є циліндри $r = \text{const}$, напівплощини $\theta = \text{const}$, площини $z = \text{const}$. Декартові координати пов'язані з циліндричними співвідношеннями $x_1 = r \cos \theta$, $x_2 = r \sin \theta$, $x_3 = z$.

У циліндричних координатах співвідношення між компонентами деформації $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z, \varepsilon_{r\theta} = \varepsilon_{\theta r}, \varepsilon_{rz} = \varepsilon_{zr}, \varepsilon_{z\theta} = \varepsilon_{\theta z}$ і компонентами вектора переміщення u_r, u_θ, u_z запишемо:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_r \right); \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \varepsilon_{\theta r} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_r}{\partial \theta} - u_\theta \right) + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right]; \quad (2)$$

$$\varepsilon_{rz} = \varepsilon_{zr} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right); \quad (3)$$

$$\varepsilon_{z\theta} = \varepsilon_{\theta z} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \right). \quad (4)$$

Рівняння рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \sigma_r - \sigma_\theta \right) + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + F_r = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + 2\sigma_{r\theta} \right) + \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial z} + F_\theta = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial \theta} + \sigma_{rz} \right) + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z = 0, \quad (7)$$

де $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \sigma_{r\theta} = \sigma_{\theta r}, \sigma_{rz} = \sigma_{zr}, \sigma_{z\theta} = \sigma_{\theta z}$ – компоненти напруг; F_r, F_θ, F_z – компоненти вектора об'ємної сили \vec{F} .

Закон Гука можна записати як співвідношення між компонентами напруг і компонентами деформацій:

$$\sigma_r = 2\mu\varepsilon_r + \lambda\varepsilon_{\text{кк}}; \quad (8)$$

$$\sigma_\theta = 2\mu\varepsilon_\theta + \lambda\varepsilon_{\text{кк}}; \quad (9)$$

$$\sigma_z = 2\mu\varepsilon_z + \lambda\varepsilon_{\text{кк}}, \quad (10)$$

$$\text{де } \varepsilon_{\text{кк}} = \varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_r \right) + \frac{\partial u_z}{\partial z}.$$

Таким чином, знаючи термічні деформації, згідно з (8), (9), (10), можна розрахувати напружено-деформований стан лінійної частини нагрівача.

Максимальні теплові напруги σ_{max} , що виникають у стінці оболонки, визначають:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\theta} \Big|_{\substack{s=0 \\ z=\pm h/2}} = \frac{1}{2} \alpha E (T_1 - T_2) \left[1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{1+\nu}{1-\nu}} \right]. \quad (11)$$

Відповідно до норм [7], розрахунок на міцність високотемпературних елементів проводять за критеріями міцності: тимчасовим опором σ_m , границею плинності σ_n і границею тривалої міцності $\sigma_{m,m}$ за робочої температур.

Номінальну допустиму напругу $[\sigma]$ визначають як найменшу з величини:

$$[\sigma] = \min \left(\frac{\sigma_m}{n_m}, \frac{\sigma_n}{n_n}, \frac{\sigma_{m,m}}{n_{m,m}} \right),$$

де коефіцієнти запасу дорівнюють $\sigma_m = 2,6$, $\sigma_n = \sigma_{m,m} = 1,5$.

Умова міцності: $\sigma_{\max} \leq [\sigma]$ (12).

Висновки. Наведена класифікація станів великих систем енергетики може бути перенесена на системи теплопостачання з трубчастими газовими нагрівачами. Запропоновано критерій надійності для безвідмовності. Викладено метод його розрахунку.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. **Руденко Ю. Н.** Надежность систем энергетики / Ю. Н. Руденко, И. А. Ушаков // М. : Наука, 1989. – 325 с.
2. Надежность систем энергетики и их оборудования: Справочник: в 4 т. Т. 3: Надежность систем газо- и нефтеснабжения / М. Г. Сухарев, С. Г. Бабаев, А. М. Бейлин [и др].; под ред. М. Г. Сухарева. – М. : Недра, 1994. – Кн. 2. – 287 с.; Т. 4: Надежность систем теплоснабжения / Е. В. Сеннова, А. В. Смирнов, А. А. Ионин и др. – Новосибирск : Наука, 2000. – 351 с.
3. **Ионин А. А.** Надежность систем тепловых сетей / А. А. Ионин. – М. : Стройиздат, 1989. – 268 с.
4. Надежность систем энергетики. Терминология: сб. рекомендуемых терминов. – М. : Наука, 1980. – Вып. 95. – 44 с.
5. **Иродов Вячеслав.** Расчет температурных удлинений инфракрасного трубчатого газового обогревателя / Валерия Ткачева, Леонтина Солод // Theoretical Foundations of Civil Engineering. – 2011. – V. 19. – P. 381 – 386.
6. **Данишевский В. В.** Термоупругое напряженно-деформированное состояние корпуса газовой горелки / В. Ф. Иродов, В. В. Ткачева // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. – Д. : ПГАСА. – 2013. – Вып. 70. – С. 84 – 92.
7. Нормы расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. – М. : Металлургия, 1973. – 408 с.

SUMMARY

Problem Statement. Reliability is a complex property that can comprise several single properties depending on the object purpose, conditions of its operation, considered space or time level of control hierarchy. The single of reliability properties of decentralized heat supply systems have not investigated practically. Necessity for including these properties in the notion «reliability» is caused by specific features of heat supply systems with tube gas heaters. This direction of research is relevant both scientific and practical values.

Analyzing of the resent research. The researching of reliability of heat supply systems with the use of methods of reliability theory began to develop in the late 1960 – early 1970 s. General principles of calculation and backup heating systems were formulated in 1972 by V. Ya. Hasylev and M. K. Takayshvili. Later this approach began to develop in researching of the Siberian Energy Institute (now the Institute of Energy named after L. A. Melentyev). Many scientists such as M. Rozkin, A. Ionin, A. Merenkov, E. Sennova, V. Sidler and others were working on reliability's problems. General theoretical methods to ensure the reliability of technical systems, special techniques that can be effectively used in systems of power were worked out by Yu. N. Rudenko.

Research objective. Reliability can be determined as an gas tube heaters property to perform the prescribed functions in the prescribed volume at certain conditions of operation. Ensuring reliability of heat supply systems with gas tube heaters is one of the most important requirements to them as at the design stage and during operation. The article provides an answer the question: «Can we all scientific – methodical achievements of the reliability of large systems of energy transfer to the research of decentralized heating systems, heating systems with tube heaters?».

Conclusions. It is considered the heat supply systems with gas tube heaters. During operation any energy object can be found in different states, determined by the states of its components. The states characterizing reliability are operating, inoperable and limit states. The classification of states for reliability definition is given.

A part of tube of the heater is heated (the temperature of the outer surface of the tube can reach 450 – 650°C). In the desing of the heaters you should consider changing the length of the pipe due to thermal expansion of the material with temperature and the proper selection and placement of fixture. Design and installation of heaters must be performed by the way when the pipe could move freely within the value calculated elongation. Failure – free operation indice of reliability that can be used to study of heat supply systems with tube gas heaters reliability was proposed. Method and mathematical model of indice calculation are presented.

REFERENCES

1. Rudenko Yu. N. Nadezhnost sistem energetiki / Yu. N. Rudenko, I. A. Ushakov // M. : Nauka, 1989. – 325 s.
2. Nadezhnost sistem energetiki i ih oborudovaniya: Spravochnik: v 4-h t. T. 3: Nadezhnost sistem gazo- i neftesnabzheniya / M. G. Suharev, S. G. Babaev, A. M. Beylin, [i dr.]; pod red. M. G. Suhareva. – M. : Nedra, 1994. – Kn. 2. – 287 s.; T. 4: Nadezhnost sistem teplosnabzheniya / E. V. Sennova, A. V. Smirnov, A. A. Ionin i dr. – Novosibirsk : Nauka, 2000. – 351 s.
3. Ionin A. A. Nadezhnost sistem teplovyih setey / A. A. Ionin. – M. : Stroyizdat, 1989. – 268 s.
4. Nadezhnost sistem energetiki. Terminologiya: Sb. rekomenduemyih terminov. – M. : Nauka, 1980. – Vyip. 95. – 44 s.
5. Irodov Vyacheslav. Raschet temperaturnyih udlineniy infrakrasnogo trubchatogo gazovogo obogrevatelya / Valeriya Tkacheva, Leontina Solod // Theoretical Foundations of Civil Engineering. – 2011. – V.19. – P. 381–386.
6. Danishevskiy V. V. Termouprugoe napryazhenno – deformirovannoe sostoyanie korpusa gazovoy gorelki / V. F. Irodov, V. V. Tkacheva // Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie: Sb. nauchn. trudov. – D. : PGASA. – 2013. –Vyip. 70. – S. 84 – 92.
7. Normyi rascheta na prochnost elementov reaktorov, parogeneratorov, sosudov i truboprovodov atomnyih elektrostantsiy, opyitnyih i issledovatel'skikh yadernyih reaktorov i ustanovok. – M. : Metallurgiya, 1973. – 408 s.

УДК 697.7 – 027.45

Науково-методичні основи вирішення проблеми надійності систем тепlopостачання з трубчастими газовими нагрівачами / В. В. Ткачова // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2014. – № 1. – С. 34 – 40. – рис. 3. – Бібліогр.: (7 назв.).

Викладено класифікацію станів, що характеризують надійність системи тепlopостачання з трубчастими газовими нагрівачами. Запропоновано критерій надійності для безвідмовності. Викладено метод та математичну модель його розрахунку.

***Ключові слова:** трубчасті газові нагрівачі, надійність, безвідмовність, метод оцінки, критерій надійності.*

Научно-методические основы решения проблемы надежности систем теплоснабжения с трубчатыми газовыми нагревателями / В. В. Ткачева // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПГАСА, 2014. – № 1. – С. 34 – 40. – рис. 3. – Бібліогр.: (7 назв.).

Предложена классификация состояний, характеризующих надежность системы теплоснабжения с трубчатыми газовыми нагревателями. Предложен критерий надежности для безотказности. Изложены метод и математическая модель его расчета.

***Ключевые слова:** трубчатые газовые нагреватели, надежность, безотказность, метод оценки, критерий надежности.*

Scientific and methodological basics for solve the problem of reliability of heat supply systems with tube gas heaters / V. Tkachova // Visnyk of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. – D. : PSACEA, 2014. – № 1. – P. 34 – 40. – pic. 3. – Bibliogr.: (7 names).

It is considered the heat supply systems with tube gas heaters. The classification of states for reliability definition is given. Failure – free operation indice was proposed. Method and mathematical model of indice calculation was presented.

***Key words:** gas tube heaters, reliability, failure - free operation, method for estimation, indice of reliability.*