

## ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ТЕПЛООБМІННИКІВ-НАГРІВАЧІВ ПРИ ЯКІСНОМУ І КІЛЬКІСНОМУ РЕГУЛЮВАННІ В ОПАЛЮВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ

**В. М. Лисенко**, к.т.н., доцент,

**В. Ф. Сіренко**, к.т.н., доцент

**А. В. Чепіжний**, асистент

Сумський національний аграрний університет

*Проведений енергетичний аналіз ефективності роботи теплообмінного обладнання в умовах змінного теплового навантаження.*

*Визначення коефіцієнта корисної дії теплообмінників є актуальним при аналізі роботи нагрівальних пристроїв опалювальних систем. Аналіз попередніх досліджень з літературних джерел показав відсутність врахування цього показника при виборі способів регулювання теплового навантаження в опалювальних системах.*

*Розглянуті показники енергетичної ефективності функціонування нагрівачів при якісному і кількісному способі регулювання навантаження.*

*При певних припущеннях отримано аналітичні залежності для кінцевих температур гріючого і нагріваємого теплоносія при зміні наступних параметрів:*

*- початкової температури гріючого теплоносія - якісний спосіб регулювання;*

*- витрати гріючого теплоносія – кількісний спосіб регулювання.*

*Для цих двох способів регулювання також отримано формули для визначення ККД теплообмінників. Встановлено, що при зниженні теплового навантаження порівняно з максимальним при якісному регулюванні коефіцієнт корисної дії не змінюється і залишається постійною величиною. При кількісному регулюванні регулювання коефіцієнт корисної дії зменшується від максимального значення при найбільшому навантаженні пропорційно зниженню витрати гріючого теплоносія.*

*Для повної реалізації позитивних сторін різних способів регулювання навантаження рекомендується застосовувати різні комбінації якісного і кількісного регулювання.*

**Ключові слова:** теплообмін, опалювальна система, якісне і кількісне регулювання, ККД теплообмінника.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Експлуатаційне регулювання теплового потоку опалювальних приладів може бути якісним і кількісним.

Якісне регулювання в системі водяного опалення здійснюється шляхом зміни температури води, яка направляється в прилади, і підтримки саме цієї температури води, при якій тепловими потоками від приладів забезпечується необхідний температурний режим приміщень будівлі.

Кількісне регулювання теплового потоку опалювального приладу здійснюється шляхом зміни кількості теплоносія (води або пари), що подається в систему або прилад. За місцем проведення воно може бути не тільки центральним і місцевим, але й індивідуальним, тобто виконуються у кожного опалювального приладу[1],[2].

При виборі теплообмінної апаратури для опалювальних систем перш за все орієнтуються на дотримання технологічних параметрів, зокрема, температури нагріваємого теплоносія. В меншій мірі звертається увага на ефективність роботи обладнання, особливо при змінному тепловому навантаженні, зокрема, на величину ККД. Тому є необхідність провести аналіз використання теплової енергії при різних варіантах регулювання теплової потужності опалювальних приладів.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Проведені раніше дослідження виявили цілу низку позитивних і негативних сторін якісного і кількісного способів регулювання теплового навантаження систем опалення [3].

#### **Якісний спосіб регулювання**

##### Переваги:

1. Стабільний гідравлічний режим теплових мереж.

Недоліки в основному стосуються умов експлуатації мереж.

1. Низька надійність джерел пікової теплової потужності.

2. Необхідність застосування дорогих методів обробки підживлювальної води тепломережі при високих температурах теплоносія.

3. Підвищений температурний графік для компенсації відбору води на гаряче водопостачання і пов'язане з цим зниження вироблення електроенергії на тепловому споживанні.

4. Висока інтенсивність корозії трубопроводів за роботи системи теплопостачання більшу частину опалювального періоду з температурами теплоносія 60-85 °С.

5. При змінній температурі мережної води істотно ускладнюється експлуатація компенсаторів.

Частина недоліків стосується режимів

роботи опалювальної системи.

6. Велике транспортне запізнювання (теплова інерційність) регулювання теплового навантаження системи теплопостачання.

7. Коливання температури внутрішнього повітря, зумовлені впливом навантаження гарячого водопостачання на роботу систем опалення та різним співвідношенням навантажень гарячого водопостачання та опалення у абонентів.

8. Зниження якості теплопостачання при регулюванні температури теплоносія по середній за кілька годин температурі зовнішнього повітря, що призводить до коливань температури внутрішнього повітря.

#### **Кількісний спосіб регулювання**

Переваги також в основному стосуються умов експлуатації:

1. Можливість застосування недорогих методів обробки підживлювальної води тепломережі при 110 °С.

2. Менша інерційність регулювання теплового навантаження, так як система теплопостачання більш швидко реагує на зміну тиску, ніж на зміну температури мережної води.

3. Постійна температура теплоносія в прямому трубопроводі тепломережі сприяє зниженню корозійних пошкоджень трубопроводів тепломережі.

4. Можливість застосування при 110 °С в місцевих системах і квартальних мережах довговічних трубопроводів з неметалевих матеріалів.

5. Підтримання постійної температури мережної води, що сприятливо позначається на роботі компенсаторів.

6. Відсутність необхідності в змішувальних пристроях абонентських ввідів.

3 економічної точки зору розглядається економія енергетичних ресурсів лише в гідравлічному тракці.

7. Збільшення вироблення електроенергії на тепловому споживанні за рахунок зниження температури зворотної мережної води.

8. Робота системи теплопостачання більшу частину опалювального періоду із зниженими витратами води та значною економією електроенергії на транспортування теплоносія.

9. Можливість додаткової економії електроенергії на привід циркуляційних насосів за рахунок збільшення природного циркуляційного тиску.

#### Недолік:

1. Змінний гідравлічний режим роботи теплових мереж.

Слід відмітити, що зовсім не розглядається питання енергетичної ефективності використання теплообмінного обладнання.

#### **Формулювання цілей статті.**

Проаналізувати теплову ефективність роботи

опалювальних приладів в умовах змінного навантаження, що керується величиною температури або витрати гріючого теплоносія.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Максимальний тепловий режим. В більшості випадків нагрівальні прилади працюють при перехресній схемі руху гріючого теплоносія (води) і нагріваємого середовища (повітря).

$T_1$  - температура води на вході, °С;  
 $T_2$  - температура води на виході, °С;  
 $t_1$  - температура повітря на вході, °С;  
 $t_2$  - температура повітря на виході, °С.

Можна вважати, що  $t_1 = \text{const}$ , бо всередині приміщення підтримується сталий температурний режим.

Теплове навантаження по воді:

$$Q = W_1(T_1 - T_2), \quad (1)$$

і по повітрю

$$Q = W_2(t_1 - t_2), \quad (2)$$

де Q – теплове навантаження, Вт;

$W_1, W_2$  – водяні еквіваленти гріючого і нагріваємого теплоносіїв, Вт/град.

Таке ж саме теплове навантаження із рівняння теплопередачі:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м<sup>2</sup>·град;

F – поверхня теплопередачі, м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{cp}$  – середня різниця температур, град.

Сталою величиною також є і поверхня теплопередачі нагрівальних приладів F.

В першому наближенні при зміні теплових навантажень коефіцієнт теплопередачі k можна вважати сталою величиною.

Середня різниця температур визначається, як середньо-логіфімічне значення для протитечії із поправкою:

$$\Delta t_{cp} = \varepsilon \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (4)$$

де  $\varepsilon < 1$  – коефіцієнт, який враховує зменшення температурного напору для перехресного току.

$\Delta t_{\delta}, \Delta t_{\text{м}}$  – більша та менша різниця температур на кінцях теплообмінника, град.

В зв'язку із малою теплоємністю повітря і незначним коефіцієнтом тепловіддачі від поверхні нагрівальних приладів до повітря різниця температур із боку входу теплоносія (води) завжди буде більшою від різниці температур на вході.

$$T_1 - t_2 = T_2 - t_1. \quad (5)$$

Тоді середня різниця температур:

$$\Delta t_{cp} = \varepsilon \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}}. \quad (6)$$

Коефіцієнт використання теплової енергії

(ККД теплообмінника) [4] є відношення теплоти фактично переданої повітрю до максимально можливої

$$\eta = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{макс}}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1}. \quad (7)$$

В формулах (1, 2, 3, 4) наведено максимальне теплове навантаження.

#### Якісне регулювання

Процес теплопередачі описується рівняннями (1 – 6), але з постановкою індексів я – якісне регулювання.

Сталою величиною в цьому випадку є витрата гріючого теплоносія (води):

$$W_1^я = W_1 = \text{const}. \quad (8)$$

Змінною величиною є початкова температура гріючого теплоносія:

$$T_1^я = A \cdot T_1, \quad (9)$$

де коефіцієнт  $A < 1$ .

Оцінка ефективності роботи теплообмінника (ККД) проводиться за виразом (7), але із врахуванням зміни поточної температури гріючого теплоносія:

$$\eta^я = \frac{Q_{\text{факт}}^я}{Q_{\text{макс}}^я} = \frac{W_1^я}{W_1} \cdot \frac{T_1^я - T_2^я}{T_1^я - t_1}. \quad (10)$$

Із врахуванням (8) та (9):

$$\eta^я = \frac{A \cdot T_1^я - T_2^я}{A \cdot T_1^я - t_1}. \quad (11)$$

Невідомою величиною є температура гріючого теплоносія на виході із нагрівача  $T_2^я$ .

Для знаходження цієї величини використаємо рівняння теплового балансу та теплопередачі.

Тепловий баланс:

$$Q_я = W_1(T_1^я - T_2^я) = W_2(t_2^я - t_1).$$

Із врахуванням (8) та (9):

$$Q_я = W_1(AT_1 - T_2^я) = W_2(t_2^я - t_1). \quad (12)$$

В рівнянні (12) дві невідомі змінні величини

$T_2^я$  та  $t_2^я$ . Для їх знаходження слід використати рівняння теплопередачі (3) та (6).

$$Q^я = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}^я, \quad (13)$$

$$\Delta t_{cp}^я = \varepsilon \frac{(AT_1 - T_2^я) - (t_2^я - t_1)}{\ln \frac{AT_1 - t_2^я}{T_2^я - t_1}}. \quad (14)$$

В (13) та (14) підставляємо вирази із (12) для

$$(t_2^я - t_1) = \frac{W_1}{W_2} (AT_1 - T_2^я) \quad (15)$$

$$\text{і для } T_2^я = \frac{W_1}{W_2} (AT_1 - T_2^я) + t_1 \quad (16)$$

і отримаємо значення температури гріючого теплоносія  $T_2^я$  на виході із нагрівача при якісному регулюванні:

$$T_2^я = \frac{AT_1 \left(1 - \frac{W_1}{W_2}\right) + t_1 \left( e^{k \cdot F \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{1}{W_1} - \frac{1}{W_2}\right)} - 1 \right)}{e^{k \cdot F \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{1}{W_1} - \frac{1}{W_2}\right)} - \frac{W_1}{W_2}}. \quad (17)$$

Цей вираз підставляємо у формулу для визначення ККД (11):

$$\eta^я = \frac{A \cdot T_1 - T_2^я}{A \cdot T_1 - t_1} = \frac{e^{k \cdot F \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{1}{W_1} - \frac{1}{W_2}\right)} - 1}{e^{k \cdot F \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{1}{W_1} - \frac{1}{W_2}\right)} - \frac{W_1}{W_2}}. \quad (18)$$

#### Кількісне регулювання

Процес теплопередачі описується, рівняннями (1-6), але з постановкою індексів к – кількісне регулювання. Температура гріючого

теплоносія – води  $T_1^к$  - в цьому випадку є сталою

величиною. Змінною величиною є  $W_1^к$  - водяний еквівалент гріючої води, причому:

$$\frac{W_1^к}{W_1} = B \Rightarrow W_1^к = B W_1. \quad (19)$$

Зменшення витрати гарячого теплоносія призведе до зниження температур  $T_2^к$  та  $t_2^к$  і до зменшення теплового навантаження.

Оцінка ефективності роботи теплообмінника (ККД) буде подібна до виразу (7), але із врахуванням зміни витрати гріючого теплоносія:

$$\eta^к = \frac{Q_{\text{факт}}^к}{Q_{\text{макс}}^к} = \frac{W_1^к (T_1 - T_2^к)}{W_1 (T_1 - t_1)} = B \frac{T_1 - T_2^к}{T_1 - t_1} \quad (20)$$

В тепловому балансі:

$$Q^к = W_1^к (T_1 - T_2^к) = W_2 (t_2^к - t_1) \quad (21)$$

Маємо дві невідомі величини  $T_2^к$  та  $t_2^к$ .

Теплопередача описується аналогічно виразами (3) та (6):

$$Q^к = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}^к, \quad (22)$$

$$\Delta t_{cp}^к = \varepsilon \frac{(T_1 - t_2^к) - (T_2^к - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2^к}{T_2^к - t_1}} = \varepsilon \frac{(T_1 - T_2^к) - (t_2^к - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2^к}{T_2^к - t_1}} \quad (23)$$

В (23) підставляємо (19, 21, 22). Після скорочень і спрощення виразів отримаємо значення температури нагріваємого теплоносія (повітря):

$$t_2^k = T_1 - (T_2^k - t_1) e^{-k \cdot F \cdot \varepsilon \left( \frac{1}{BW_1} - \frac{1}{W_2} \right)} \quad (24)$$

(24) підставляємо в (21) і знаходимо кінцеву температуру гріючого теплоносія (води)

$$T_2^a = \frac{T_1 \left( 1 - \frac{BW_1}{W_2} \right) + t_1 \left( e^{k \cdot F \cdot \varepsilon \left( \frac{1}{BW_1} - \frac{1}{W_2} \right)} - 1 \right)}{e^{k \cdot F \cdot \varepsilon \left( \frac{1}{BW_1} - \frac{1}{W_2} \right)} - \frac{BW_1}{W_2}} \quad (25)$$

Після підстановки (25) в (20) отримали вираз для ККД:

$$\eta^k = B \frac{e^{k \cdot F \cdot \varepsilon \left( \frac{1}{BW_1} - \frac{1}{W_2} \right)} - 1}{e^{k \cdot F \cdot \varepsilon \left( \frac{1}{BW_1} - \frac{1}{W_2} \right)} - B_1 \frac{W_1}{W_2}} \quad (26)$$

Тобто  $\eta^k = f(B)$ .

Отримані вирази (18), (26) показують, що коефіцієнти корисної дії теплообмінників при якісному і кількісному регулюванні приймають однакове значення при максимальному тепловому навантаженні в найбільш холодну пору року.

Коефіцієнт використання теплової енергії гріючого теплоносія при якісному регулюванні не залежить від значення початкової температури і є величиною сталою, про що свідчить вираз (18).

Із аналізу виразу (26) можна зробити висновок, що при кількісному регулюванні теплового навантаження нагрівачів шляхом зменшення витрати гріючого теплоносія коефіцієнт використання теплової енергії зменшується при різних значеннях співвідношення водяних еквівалентів теплоносіїв.

**Висновки.** Отримані аналітичні вирази для визначення ККД теплообмінників при змінному навантаженні для якісного і кількісного регулювання.

Встановлені особливості залежностей коефіцієнтів корисної дії від керуючих факторів при різних способах регулювання теплового навантаження нагрівальних приладів.

Підвищення ефективності роботи опалювальних приладів можливе при різних комбінаціях способів регулювання навантаження.

### **Список використаної літератури:**

1. Богословский В.Н., Сканава А.Н. Отопление/ Учебник для вузов -М.: Стройиздат, 1991-735с.
2. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети/Учебник для вузов. Москва, Издательство МЭИ, 2001. - 472с.
3. Шарапов В.И., Ротов П.В. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения. М.: Изд-во "Новости теплоснабжения", 2007. - 164 с.
4. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе: пер. с нем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 384 с.

#### ***Лысенко В.Н., Сиренко В.Ф., Чепижный А.В. Сравнение эффективности работы теплообменников-нагревателей при качественном и количественном регулировании в отопительной системе***

*Проведен энергетический анализ эффективности работы теплообменного оборудования в условиях переменной тепловой нагрузки.*

*Определение коэффициента полезного действия теплообменников является актуальным при анализе работы нагревательных устройств отопительных систем. Анализ предыдущих исследований по литературным источникам показал отсутствие учета этого показателя при выборе способов регулирования тепловой нагрузки в отопительных системах.*

*Рассмотрены показатели энергетической эффективности функционирования нагревателей при качественном и количественном способах регулирования нагрузки.*

*При определенных допущениях получены аналитические зависимости для конечных температур греющего и нагреваемого теплоносителей при изменении таких параметров:*

*- первоначальной температуры греющего теплоносителя - качественный способ регулирования;*

*- расхода греющего теплоносителя – количественный способ регулирования.*

*Для этих двух способов регулирования также получены формулы для определения КПД теплообменников. Установлено, что при снижении тепловой нагрузки по сравнению с максимальной при качественном регулировании коэффициент полезного действия не изменяется и остается постоянной величиной. При количественном регулировании регулировании коэффициент полезного действия уменьшается от максимального значения при наибольшей нагрузке пропорционально снижению расхода греющего теплоносителя.*

*Для полной реализации положительных сторон разных способов регулирования нагрузки рекомендуется применять различные комбинации качественного и количественного регулирования.*

***Ключевые слова:*** теплообмен, отопительная система. качественное и количественное регулирование, КПД теплообменника.

#### ***Lysenko V.N., Sirenko V.F., Chevigny V.A. Comparison of the efficiency of heat exchangers-heaters in the qualitative and quantitative regulation in the heating system***

*Energy efficiency analysis of heat transfer equipment in the conditions of variable heat capacity was performed.*

*Definition of coefficient of performance of heat exchangers is relevant in the analysis of the heating devices heating systems. Analysis of previous studies from the literature showed a lack of consideration of this indicator, if the heat load control in heating systems.*

*Indicators of energy efficiency of heat pump water heater qualitative and quantitative methods, load management were considered.*

*Under certain assumptions, the analytical expressions for the finite temperatures of the heating and heated fluids were obtained when changing such parameters:*

*- the initial temperature of the heating fluid - quality control method;*

*- consumption of heating of the coolant – quantitative method of regulation.*

*For these two methods of regulation are also obtained formulas for determining the efficiency of heat exchangers. Found that by reducing the heat load compared to the maximum in quality regulation efficiency does not change and remains constant. In the quantitative regulation of the efficiency decreases from a maximum value at the highest load in proportion to the decrease in the consumption of heating of the coolant.*

*To fully realize the positive aspects of different methods of load control it is recommended to use different combinations of qualitative and quantitative regulation.*

***Keywords:*** heat transfer, heating system. qualitative and quantitative regulation, efficiency of the heat exchanger.

Рецензент: д.т.н., професор Павлюченко А.М.