

Корисна модель належить до способів дослідження і може бути використана для визначення товщини накипу на внутрішній поверхні труб системи водогрійного котла, який утворюється у процесі його експлуатації.

Відомим способом визначення товщини накипу на внутрішній поверхні труби є застосування прямого вимірювання, яке можливе шляхом вирізання труби (або її фрагменту) з подальшим застосуванням механічного вимірювального інструменту (наприклад нутроміра, штангенциркуля тощо) [1]. Суттєвим недоліком цього аналога є фізична неможливість використання вимірювального інструменту без порушення цілісності котла.

З рівня техніки не виявлено найближчого аналога до запропонованої корисної моделі.

В основу корисної моделі поставлено задачу визначення належних умов, які необхідні для коректного вимірювання температурного поля і визначення реального зв'язку між параметрами температурного поля та товщиною накипу, що забезпечить розраховувати останнє.

Поставлена задача вирішується в способі визначення товщини накипу на внутрішній поверхні труб системи водогрійного котла, що включає дії, в ході яких вимірюють температуру оточуючого середовища та зовнішньої поверхні труби, температури теплоносія за його станом на вході і на виході труби, товщини стінки труби, внутрішнього діаметра труби, вимірюють температуру поверхні труби всередині довжини системи після її стабілізації під час подачі на вхід котла, що не працює, заздалегідь нагрітого до робочої температури системи, теплоносія, після чого розраховують товщину накипу за рівнянням теплового балансу вказаної системи, за формулою:

$$h = \frac{1}{2} \left(d_{т.в} - \frac{d_{т.в}}{\exp(A)} \right),$$

де:

h - товщина накипу;

$d_{т.в}$ - внутрішній діаметр труби без накипу, який дорівнює:

$d_{т.з} - 2S$;

$d_{т.з}$ - зовнішній діаметр труби;

S - товщина стінки труби;

параметр A обраховують за формулою:

$$A = \left(\frac{2 \cdot \lambda_n \cdot (t_{теп} - t_{ст})}{\alpha \cdot d_{т.з} \cdot (t_{ст} - t_{пов})} - \frac{\lambda_n}{\lambda_t} \cdot \ln \frac{d_{т.з}}{d_{т.в}} \right),$$

де:

λ_n - коефіцієнт теплопровідності накипу;

$t_{теп}$ - температура теплоносія;

$t_{ст}$ - температура поверхні труби;

α - коефіцієнт тепловіддачі системи;

$t_{пов}$ - температура оточуючого середовища;

λ_t - коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби (сталі).

Головними ознаками пропонованої корисної моделі є: вимірювання температур оточуючого середовища, визначення температури теплоносія у середині довжини системи, за станом температури на вході і на виході системи, вимірювання товщини стінки труби та внутрішнього діаметра труби, застосування заздалегідь нагрітого до робочої температури теплоносія, та визначення температури поверхні труби, всередині довжини системи, після стабілізації температурного стану.

Температури оточуючого середовища, зовнішньої поверхні труби, тепло носія, внутрішнього діаметра труби, товщини стінки труби необхідні для формування рівняння теплового балансу системи.

Відсутність цих даних унеможливує розв'язання складеного рівняння теплового балансу системи та визначення товщини шару накипу.

Застосування заздалегідь нагрітого до робочої температури теплоносія необхідні для контрольованого спрямування теплового потоку із середини труб системи водогрійного котла на зовні, що зумовлює коректне розв'язання складеного рівняння теплового балансу системи.

Витримка системи до стабілізації її температурного стану, а також визначення температури зовнішньої поверхні труби та теплоносія всередині довжини системи необхідні для обґрунтованого спрощеного розв'язання рівняння теплового балансу шляхом усунення динамічних складових та введення кореляції між температурою теплоносія та температурою поверхні труби у точці проведення дослідження.

Всі ознаки корисної моделі взаємопов'язані і сприяють вирішенню поставленої задачі. Відсутність цих ознак не дозволяє коректно розрахувати товщину накипу.

Технічним результатом представленої корисної моделі є можливість визначати товщину накипу на внутрішній поверхні труб системи водогрійного котла, у тих випадках, коли пряме вимірювання не може бути застосовано.

Вирішення технічного результату забезпечують складанням рівняння теплового балансу, складовими якого виступають:

- енергію, що передають назовні від нагрітого теплоносія через шари накипу та матеріал стінки труби (тепловий потік);

- енергія від зовнішньої поверхні труби до оточуючого середовища (конвективний потік).

Тепловий потік від теплоносія визначають за рівнянням [2]:

$$Q_1 = \frac{\pi(t_{\text{теп}} - t_{\text{ст}})L}{R} ; (1)$$

де тепловий опір:

$$R = \frac{1}{2\lambda_{\text{н}}} \cdot \ln \frac{d_{\text{т.в}}}{d_{\text{н.в}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{т}}} \cdot \ln \frac{d_{\text{т.з}}}{d_{\text{т.в}}} ; (2)$$

$t_{\text{теп}}$ - температура теплоносія відповідно до технічних характеристик котла;

$t_{\text{ст}}$ - вимірювана характерна температура поверхні труби;

L - довжина труби відповідно до технічних характеристик котла;

$\lambda_{\text{н}}$ - коефіцієнт теплопровідності накипу, який згідно з довідковими даними дорівнює 0,13...3,14 Вт/(м·К) [2];

$\lambda_{\text{т}}$ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби, зокрема для сталі він дорівнює 52...53 Вт/(м·К) [2];

$d_{\text{т.в}}$ - внутрішній діаметр труби, який може бути визначений як $d_{\text{т.з}} - 2S$, де $d_{\text{т.з}}$ - зовнішній діаметр та S - товщина стінки труби, відповідно - згідно з технічними характеристиками котла;

$d_{\text{н.в}}$ - внутрішній діаметр отвору в трубі, що утворюється після нашарування накипу.

Конвективний потік від зовнішньої поверхні труби до оточуючого середовища визначають за рівнянням [2]:

$$Q_2 = \alpha F(t_{\text{ст}} - t_{\text{пов}}); (3)$$

де:

$$F = \pi d_{\text{т.з}} L; (4)$$

$t_{\text{пов}}$ - вимірювана температура повітря в приміщенні, де знаходиться котел (за нормальних умов вона дорівнює 20 °С.

α - коефіцієнт тепловіддачі при конвекційного теплообміну, який для природної конвекції у повітрі знаходиться в межах 2...25 Вт/(м²·К), а для водогрійного котла може бути прийнятим 5 Вт/(м²·К) [4, 5]

Тепловий баланс визначають рівнянням:

$$Q_1 = Q_2; (5)$$

При підстановці формул (1)...(4) в рівняння (5) після простих перетворень отримаємо:

$$R = \frac{1}{2\lambda_{\text{н}}} \cdot \ln \frac{d_{\text{т.в}}}{d_{\text{н.в}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{т}}} \cdot \ln \frac{d_{\text{т.з}}}{d_{\text{т.в}}} = \frac{(t_{\text{теп}} - t_{\text{ст}})}{\alpha d_{\text{т.з}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{пов}})} , (6)$$

відкіля, враховуючи відокремлений допоміжний параметр:

$$A = \ln \frac{d_{\text{т.в}}}{d_{\text{н.в}}} = \left(\frac{2\lambda_{\text{н}}(t_{\text{теп}} - t_{\text{ст}})}{\alpha d_{\text{т.з}}(t_{\text{ст}} - t_{\text{пов}})} \right) - \frac{\lambda_{\text{н}}}{\lambda_{\text{т}}} \cdot \ln \frac{d_{\text{т.з}}}{d_{\text{т.в}}} (7)$$

виходить:

$$d_{\text{н.в}} = \frac{d_{\text{т.в}}}{\exp(A)} ; (8)$$

Тоді з урахуванням (8), кінцева формула для розрахунку товщини накипу:

$$h = \frac{1}{2} \left(d_{\text{т.в}} - \frac{d_{\text{т.в}}}{\exp(A)} \right) , (9)$$

яка є ідентичною математичному виразу в формулі корисної моделі.

Запропонована корисна модель перевірена при визначенні товщини накипу на внутрішній поверхні труб системи спisanого водогрійного котла НІСТУ-5 [6].

На вхід котла подавали технічну воду, попередньо нагріту в іншому працюючому котлі до температури 96 °С, що відповідало робочому діапазону 85...115 °С котла [6]. Після стабілізації температури системи, температура теплоносія на виході котла стала на позначці 92 °С. Тоді середнє арифметичне значення температури теплоносія $t_{\text{теп}}$ у середині довжини труби системи визначили як: $(96^\circ + 92^\circ)/2 = 94^\circ$, а виміряна температура поверхні труби у цій же точці склала 91 °С. Температура оточуючого середовища $t_{\text{пов}}$ становила 24°.

Згідно з технічними характеристиками котла НІСТУ-5 [6] визначили:

$$D_{\text{т.з}} = 0,076 \text{ м};$$

$$S = 0,0035 \text{ м};$$

$$D_{\text{т.в}} = d_{\text{н.з}} = d_{\text{т.з}} - (2 \cdot 0,0035) = 0,069 \text{ м};$$

Згідно з довідковими даними [2, 5] прийняли:

$$\alpha=5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К});$$

$$\lambda_{\text{н}}=1,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$\lambda_{\text{т}}=53 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

З використанням представлених даних за формулою (7) отримали:

$$A = \left(\frac{2 \cdot 1,5 \cdot (94 - 91)}{5 \cdot 0,076 \cdot (91 - 24)} - \frac{1,5}{53} \cdot \ln \frac{0,076}{0,069} \right) = 0,3223$$

а за формулою (9) - кінцевий результаті, після підставлення коефіцієнта А в розрахунку:

$$h = \frac{1}{2} \left(0,069 - \frac{0,069}{\exp(0,3223)} \right) = 0,0095 \text{ м}$$

Ці дані були співставлені з результатами прямих вимірювань із застосуванням штангенциркуля, на зразках, отриманих після розрізання труб дослідного котла, де виміряна товщина накипу складала 0,0102.

Порівняльний аналіз цих значень з розрахунковими значеннями за ознаками корисної моделі показав різницю у менш ніж 7 %.

На підставі вищевикладеного, можна зробити висновок, що запропонований спосіб визначення товщини накипу на внутрішній поверхні труб системи водогрійного котла працездатний і може бути застосовано в реальних умовах.

Джерела інформації:

1. Клименко Л.П., Пізінцалі Л.В., Александровська Н.І., Євдокимов В.Д. Метрологія, стандартизація та управління якістю. - Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. - 248 с.

2. Погорєлов А.І. Тепломасообмін (основи теорії і розрахунку): навчальний посібник для вузів, 2-ге видання. - Львів: "Новий світ - 2000", 2004. - 144 с.

3. СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ ДЛЯ СТАЦІОНАРНОГО ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В ТРУБАХ: пат. UA32751U УКРАЇНА МПК G01N 25/18. № u200801091; заяв 30.01.2008; опубл. 26.05.2008, Бюл. № 10, 2008 р.

4. Natural Convection: Understanding Heat Transfer in Fluid Systems URL: <https://cfdland.com/natural-convection-understanding-heat-transfer-in-fluid-systems/> (дата звернення 10/05/2025)

5. CONVECTIVE HEAT TRANSFER URL: <https://www.thermopedia.com/content/660> (дата звернення 10/05/2025)

6. Котел водогрійний НІИСТУ-5 URL: <https://mmzavod.com.ua/index.php/kotly-vodogreinye/kotel-niistu-5> (дата звернення 10/05/2025)