

ОПТИМАЛЬНІ ФОРМИ ТА ІЗОЛЯЦІЯ ЄМНІСНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ТЕПЛОТИ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

© Венгльовський В.І., 2013

Наведено результати дослідження бака-акумулятора як накопичувальної ємності. Запропоновані ємності баків-акумуляторів із різними формами днищ, обчислено їх розміри. Враховано товщину ізоляції акумулятора з оптимальних умов. Знайдено час остигання акумуляторного середовища.

Ключові слова: енергозбереження, бак-акумулятор, енергоефективність, теплова ізоляція.

In this article the results of research of tank of accumulator are resulted as capacity heat exchangers. Offered capacities of tanks of accumulators with the different forms of bottoms, their sizes are found. Deductible thickness of the insulation of accumulator with optimum conditions. Time of cooling of accumulator is found.

Key words: energy conservation, tank-accumulator, energy efficiency, thermal insulation.

Постановка проблеми

Для приєднання систем обігрівання, вентиляції, гарячого водопостачання окремих будівель або їх частин влаштовують індивідуальні теплові пункти (ІТП), а для двох і більше будівель – центральні теплові пункти (ЦТП). На вводі теплових мереж до окремої будівлі чи її частини обов'язково мають бути ІТП незалежно від того чи є приєднана ця будівля до ЦТП чи ні. Улаштування ЦТП потребує техніко-економічних обґрунтувань і розрахунків. У ІТП окремої будівлі чи її частини передбачаються лише ті заходи, які необхідні для їх приєднання і не передбачені у ЦТП. Приєднують споживачів до теплових мереж у теплових пунктах за схемами, які забезпечують мінімальні витрати води, економлять теплоту та обмежують максимуми, регулюючи витрати мережної води, знижують її температуру для систем опалення, вентиляції й кондиціонування повітря. Для систем гарячого водопостачання (СГВ) можуть бути передбачені баки-акумулятори (БА), захищені на внутрішніх поверхнях від корозії та накипу. БА встановлюють як на джерелі (25 % загального об'єму всіх БА) теплової енергії, так і в ЦТП. Транзитні тепломагістралі можуть бути акумуляторними ємностями. Встановлювати БА в житлових кварталах не допускається. БА промислових підприємств використовують для вирівнювання нерівномірності графіка споживання води об'єктами із зосередженими короткочасними витратами води на гаряче водопостачання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Акумулятори теплоти передбачають у системах теплопостачання з традиційними і нетрадиційними (альтернативними) джерелами тепла [1–12]. Працюють нетрадиційні джерела тепла нестабільно [7]. Теплові акумулятори або баки-акумулятори не тільки накопичують тепло для потреб СГВ, а згладжують піки теплових навантажень в інших системах. Альтернативні джерела енергії (вітрова, сонячна, геотермальна, гідравлічна та інші) значною мірою повинні замінювати теплову енергію існуючих традиційних джерел тепла [3, 6, 7, 10].

Мета та завдання досліджень

Потрібно отримати залежності для знаходження геометричних розмірів циліндричних баків-акумуляторів з плоскими, еліптичними і сферичними днищами. Товщину ізоляції БА знайти з умови допустимого теплового потоку. Встановити час остигання акумуляторного середовища БА.

Викладення основного матеріалу

Запасні й регулюючі ємності, до яких належать БА, повинні мати достатні об'єми води для регулювання водоспоживання. БА можуть бути безнапірними і під тиском. Безнапірні БА треба передбачати у мережах холодного і гарячого водопостачання для створення запасів води у споживачів із короткочасними зосередженими витратами води під час максимального годинного споживання теплоти. Напірні і безнапірні БА теплоти повинні встановлюватися за вимогами [5, 11, 12]. Ємність баків-акумуляторів теплової енергії залежить від очікуваного надходження теплоти традиційних (основних) й альтернативних (додаткових) джерел тепла. Ці джерела можуть працювати в стаціонарному або змінному режимах. Ємність БА залежить від кількості теплової енергії, характеру очікуваних навантажень, надійності систем тепlopостачання, способів використання енергії додаткових джерел теплової енергії, економічного співвідношення між енергією додаткових і основних джерел тепла або від коефіцієнта заміщення тепла різних джерел. Відкриті БА встановлюють у найвищих точках систем тепlopостачання з обов'язковою переливною та іншими трубами [5, 11]. Найпоширенішими додатковими джерелами теплової енергії, яку застосовують для нагрівання води в ємнісних БА є тепла енергія сонячних колекторів, існуючих традиційних джерел тепла й теплових електричних нагрівачів. Закриті БА знаходяться під тиском теплової чи водопровідної мережі, мають більший ніж відкриті БА об'єм. Акумулятори тепла накопичують, зберігають і віддають теплову енергію споживачам, підвищують коефіцієнт використання енергії, заміщаючи частину навантажень традиційних джерел тепла. Теплообмінні апарати можуть бути з прямим і непрямим акумулюванням тепла. Пряме акумулювання тепла полягає в тому, що акумулювальний матеріал є одночасно теплоносієм. Непряме акумулювання відбувається між середовищами, одне з яких не є теплоносієм.

Якщо продуктивність основного і додаткового джерела, чи окремо кожного, чи одного з них у певні години доби перевищує теплове навантаження споживачів, то надлишкова тепла енергія повинна накопичуватись у БА. Коефіцієнт корисної дії теплового акумулятора

$$h_{БА} = \frac{Q_{БА} - Q_{тв}}{Q_{БА}} = 1 - \frac{Q_{тв}}{Q_{БА}}, \quad (1)$$

де $Q_{БА}$ – теплота, акумульована в БА; $Q_{тв}$ – теплота, втрачена із БА.

Форма баків-акумуляторів може бути циліндричною із еліптичними, сферичними або плоскими днищами. Зовнішня поверхня БА та його об'єм становлять

$$S_{БА} = S_{цил} + S_{дн}; \quad (2)$$

$$V_{БА} = V_{цил} + V_{дн}, \quad (3)$$

де $S_{цил}$, $S_{дн}$, $V_{цил}$, $V_{дн}$ – відповідно площі та об'єми циліндричних частин і днищ БА.

Еліптичні днища БА повинні бути відбортованими і відповідати вимогам [4]. Величина відбортовки врахована у висоті циліндричної частини БА. Тоді еліптичні днища будуть половинами еліпсоїда

$$\frac{x^2}{R^2} + \frac{y^2}{R^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1. \quad (4)$$

Звідки

$$z = \frac{c}{R} \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}, \quad (5)$$

$$\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} = \frac{c}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}}. \quad (6)$$

Поверхня одного днища $S_{дн}$ рівновелика половині поверхні сплющеного еліпсоїда.

$$S_{\partial H} = \int_{-R}^R \left(\int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^{\sqrt{R^2-x^2}} \frac{c}{\sqrt{R^2-x^2-y^2}} dy \right) dx = 2pRc, \quad (7)$$

$S_{\partial H} = 2\pi R^2$ (півсфера), якщо $c=R$, $S_{\partial H} = \pi R^2$ (пів сплющеного еліпсоїда (8)), при $c=R/2$.

Об'єм днища

$$V_{\partial H} = \int_{-R}^R \left[\int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^{\sqrt{R^2-x^2}} \left(\int_0^{\frac{c}{R}\sqrt{R^2-x^2-y^2}} dz \right) dy \right] dx = \frac{2}{3}pR^2c, \quad (8)$$

$V_{\partial H} = 2\pi R^3/3$, якщо $c=R$, $V_{\partial H} = \pi R^3/3$ при $c=R/2$.

Крім еліптичних днищ, БА можуть мати сферичні або плоскі днища. Зовнішня поверхня і об'єм БА із сферичними днищами становить

$$S = 2pR(2R + H), \quad (9)$$

$$V = pR^2\left(\frac{4R}{3} + H\right). \quad (10)$$

Виразивши поверхню S через об'єм V отримуємо $S = f(V)$

$$S = \frac{4pR^2}{3} + \frac{2V}{R}. \quad (11)$$

Знаходимо похідні $\frac{dS}{dR}$, $\frac{d^2S}{dR^2}$ і встановлюємо, що мінімум функції (11) буде за умови

$$R = \sqrt[3]{\frac{3V}{4p}}. \quad (12)$$

З урахуванням (10) і (12) отримуємо

$$H = \frac{4}{3}\sqrt[3]{\frac{3V}{4p}} - \frac{4}{3}\sqrt[3]{\frac{3V}{4p}} = 0. \quad (13)$$

Тобто найменша поверхня БА буде за відсутності циліндричної частини, отже БА має бути кулею радіуса R .

Для БА циліндричної форми з плоскими днищами зовнішня поверхня і об'єм акумулятора будуть

$$S = 2pR^2 + 2pRH, \quad (14)$$

$$V = pR^2H. \quad (15)$$

Виразимо висоту циліндричної частини БА через його об'єм, отримаємо

$$S = 2pR^2 + \frac{2V}{R}. \quad (16)$$

Мінімум функції (16) отримаємо з умови $\frac{\partial S}{\partial R} = 0$

$$4pR - \frac{2V}{R^2} = 0, \quad (17)$$

звідки

$$R = \sqrt[3]{\frac{V}{2p}}. \quad (18)$$

За умови (15) висота акумулятора буде

$$H = \frac{V}{P \left(\sqrt[3]{\frac{V}{2P}} \right)^2} = \sqrt[3]{\frac{4V}{P}}. \quad (19)$$

Оскільки $D=2R$

$$D = 2R = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{V}{2P}} = \sqrt[3]{\frac{4V}{P}}. \quad (20)$$

Поверхня БА заданого об'єму V буде найменша за умови $H=D$.

Однак, враховуючи стратифікацію води, його висота повинна бути $H \geq 2,5D$ [1].

Питомий тепловий потік через багат шарову циліндричну стінку акумулятора в усталеному тепловому стані знаходимо за виразом [8]:

$$q_{цил} = \frac{p \cdot (t_{вн} - t_{зов})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2I_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2I_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2I_3} \ln \frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{\alpha_2 d_4}} = p \cdot k_{цил} (t_{вн} - t_{зов}) \leq [q_{цил}], \quad (21)$$

де $t_{вн}$, $t_{зов}$ – відповідно температури акумуляційного і зовнішнього середовищ; α_1 , α_2 – коефіцієнти тепловіддачі на внутрішній і зовнішній поверхнях стінки акумулятора; λ_1 , λ_2 , λ_3 – коефіцієнти теплопровідності стінки бака-акумулятора, основного і покривного шарів теплоізоляції; d_1 – внутрішній діаметр корпусу БА; d_2 – зовнішній діаметр стінки корпусу БА, він же внутрішній діаметр ізоляційного шару; d_3 – зовнішній діаметр ізоляційного шару або внутрішній діаметр покривного шару; d_4 – зовнішній діаметр покривного шару БА; $k_{цил}$ – коефіцієнт теплопередачі тришарової конструкції стінки БА; $[q_{цил}]$ – допустимий тепловий потік [12].

Питомий тепловий потік через плоскі дніща знаходимо за виразом

$$q_{дн} = \frac{(t_{вн} - t_{зов})}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^3 \frac{d_i}{I_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = k_{дн} (t_{вн} - t_{зов}) \leq [q_{дн}], \quad (22)$$

де α_1 , α_2 – коефіцієнти тепловіддачі на внутрішній і зовнішній поверхнях стінок дніщ акумулятора; δ_1 , δ_2 , δ_3 – відповідно товщини стінок дніщ, ізоляційного і покривного шарів БА; λ_1 , λ_2 , λ_3 – коефіцієнти теплопровідності стінок, основного і покривного шарів теплоізоляції дніщ бака-акумулятора; $k_{дн}$ – коефіцієнт теплопередачі тришарової конструкції дніщ БА; $[q_{дн}]$ – допустимий тепловий потік через дніща БА [12].

У випадку сферичних дніщ величина питомого теплового потоку дорівнює [8]

$$q_{сф} = \frac{p \cdot (t_{вн} - t_{зов})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \frac{1}{2I_1} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{2I_2} \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3} \right) + \frac{1}{2I_3} \left(\frac{1}{d_3} - \frac{1}{d_4} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_4^2}} = p \cdot k_{сф} (t_{вн} - t_{зов}) \leq [q_{сф}], \quad (23)$$

де $k_{сф}$ – коефіцієнт теплопередачі тришарової конструкції сферичних дніщ БА; $[q_{сф}]$ – допустимий тепловий потік через сферичні дніща БА [12].

Для еліптичних дніщ питомий тепловий потік, як і в сферичних та плоских дніщах, буде напрямлений по нормалі до еліптичних дніщ.

Величина питомого теплового потоку $q_{ел}$ через еліптичні дніща буде знаходитись між значеннями $q_{пл} \leq q_{ел} \leq q_{сф}$ залежно від величини сплюснення еліпсоїда. Точне знання цих величин можна отримати через еліптичні координати замість циліндричних або сферичних.

Товщини окремих шарів ізоляції знаходимо за величиною допустимих теплових потоків методом послідовних наближень або методом ітерацій [2, 12].

Товщину окремого шару ізоляції плоских і циліндричних конструкцій БА знаходимо

$$d_{i3} = l_{i3} R_{i3}, \quad (24)$$

$$d_{i3} = 0,5d(B-1), \quad (25)$$

а B задовольнити умову

$$B = \exp[2pl_{i3}(t_2 - t_n)(\alpha_3 d(t_n - t_n)B)^{-1}], \quad (26)$$

де l_{i3} – коефіцієнт теплопровідності матеріалу ізоляції, t_2 – температура гарячої води в БА, t_n – температура на поверхні ізоляції, α_3 – коефіцієнт тепловіддачі зі зовнішньої поверхні БА, t_n – температура навколишнього середовища.

Величину B із рівняння (26) шукаємо методом послідовних наближень [2, 12].

Знаючи товщину δ_{i3} i -го ізоляційного шару і його лінійні розміри $l_i, l_{(i+1)}$ для заданої форми БА можна знайти масу кожного із цих шарів

$$M_{i3,i} = 0,5(F_{\text{вн},i} + F_{\text{зов},i})d_{i3,i} \cdot r_{i3,i}, \quad (27)$$

де $F_{\text{вн},i}, F_{\text{зов},i}$ – відповідно площі внутрішньої та зовнішньої поверхонь цих шарів; $\rho_{i3,i}$ – густина i -го ізолювального шару. Знайдена товщина ізоляції баків-акумуляторів не повинна перевищувати граничних значень [12].

Формула (27) справедлива для конструкції бака-акумулятора з лінійними розмірами l_i та $l_{(i+1)}$ на цих поверхнях за умови $0,5(l_i + l_{(i+1)}) \gg d_i$.

Акумулявальне середовище з густиною ρ і питомою теплоємністю σ в БА об'єму V , охолоджуючись із однакою швидкістю $\frac{dt}{dt}$ за час dt віддає таку кількість теплоти

$$\Delta Q = -Vrc \left(\frac{dt}{dt} \right) dt. \quad (28)$$

У цей же час та сама кількість теплоти передається від акумулявального середовища в навколишнє середовище із температурою t_n :

$$\Delta Q = aF(t - t_n), \quad (29)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі із зовнішньої поверхні БА; F – зовнішня поверхня БА.

У стаціонарному режимі можна прирівняти вирази (28) і (29) і отримати

$$\frac{dt}{t - t_n} = -\frac{aF}{Vrc} dt. \quad (30)$$

Після інтегрування виразу (30) отримуємо

$$\ln(t - t_n) = -\frac{aFt}{Vrc} + C. \quad (31)$$

Враховуючи початкові умови, якщо $\tau=0$, $(t-t_n) = (t-t_n)_o$, отримуємо $C = \ln(t-t_n)_o$, тоді

$$\ln \frac{t - t_n}{(t - t_n)_o} = -\frac{aFt}{Vrc} \quad (32)$$

або

$$T = \frac{t - t_n}{(t - t_n)_o} = \exp\left(-\frac{aFt}{Vrc}\right). \quad (33)$$

Температура теплоакумулювального середовища зменшується від $(t-t_n)_0$ при $t=0$ до $(t-t_n)=0$ при $t=\infty$ і тим швидше, чим більше $\frac{aF}{Vrc}$, тобто за час τ температура акумулювального середовища знизиться до температури t_n навколишнього середовища.

Висновки

Зменшено втрати теплоти циліндричних баків-акумуляторів з оптимальними формами. Розглянуто БА циліндричної форми з плоскими, еліптичними й сферичними днищами. З умов допустимого теплового потоку знайдено методом ітерацій товщини ізоляційного й покривного шарів акумулятора. Встановлено час остигання акумулювального середовища БА.

1. Бекман Г., Гилли П. *Тепловое аккумулярование энергии*. – М.: Мир, 1987. – 271 с.
2. Венгльовський В.І. Застосування ємнісних теплообмінників із гвинтовими змійовиками для акумулювання гарячої води в системах теплопостачання // *Теорія і практика будівництва*. – 2009. – № 655. – С. 28–33.
3. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Дроздова О.І. Аналіз основних положень Дорожньої Карти ЄС з енергетики до 2050 року // *Промтеплотехніка*. – 2012. – Т. 34, № 6. – С. 64–69.
4. ГОСТ 6533-78. Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов. Основные размеры. – М.: Издательство стандартов, 1979. – 36 с.
5. ДБН В. 2.5–39.2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 69 с.
6. Долінський А.А., Басок Б.І., Базєєв Є.Т. Регіональні програми модернізації комунальної теплоенергетики – інноваційна основа теплотехнічного оновлення систем теплозабезпечення населених пунктів України // *Промтеплотехніка*. – 2012. – Т. 34, № 4. – С. 44-51.
7. Кудря С. Акумулювання тепла з відновлюваних джерел енергії // *Ринок інсталяцій*. – 2008. – № 1. – С. 8–12, № 2. – С. 6–9, № 3. – С. 13–14.
8. Михеев М.А., Михеева И.М. *Основы теплопередачи*. М., Энергия, 1973.–320 с.
9. Пирков В.В. *Особенности проектирования современных систем водяного отопления*. – К.: Такі справи, 2003. – 168 с.
10. Сиворакиша В.Е., Марков В.Л. *Технико-экономический анализ поддержания температуры в тепловых аккумуляторах* // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2008. – № 4. – С. 25–32.
11. СНиП 2.04.01-85. *Внутренний водопровод и канализация зданий*, Госстрой СССР, М.: Стройиздат, 1986. – 56 с.
12. СНиП 2.04.14-88. *Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов*, Госстрой СССР, М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 32 с.