

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ АКУМУЛЯТОРІВ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ, ЯК ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ

Б. І. Котов, доктор технічних наук, професор

Подільський державний аграрно-технічний університет

В. О. Грищенко, кандидат технічних наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Є. О. Пилипенко

E-mail: vlgr@nubip.edu.ua

Анотація. В статті визначена актуальність досліджень варіантів використання теплового акумулятора в системі теплопостачання виробничих приміщень. Розглянуто типові технологічні схеми рідинних акумуляторів теплоти та визначено недоліки існуючих математичних моделей. Обрано та проаналізовано технологічну схему акумулятора ємнісного типу як найбільш розповсюдженого в системах сонячного опалення та гарячого водопостачання. Визначено, що для нестационарного процесу не можна нехтувати тепловою інерцією арматури корпусу та теплоізоляції, тому неможна розглядати бак-акумулятор як одноємнісний об'єкт. На основі аналізу теплового балансу елементів конструкцій теплоакumuлюючих пристроїв сформульовано математичну модель динаміки бака-акумулятора як двоємнісного об'єкта із зосередженими параметрами. Отримана спрощена математична модель дозволяє параметрично ідентифікувати об'єкт моделювання (водяний акумулятор ємнісного типу). У розглянутому варіанті теплоаккумулятор використовують у системах сонячного гарячого водопостачання для попереднього нагрівання води. Для використання в двоконтурних системах сонячного опалення та гарячого водопостачання використовують геліоколектори з антифризом, а нагрівання води в теплоакumuлювальній ємності реалізують з використанням теплообмінників. Сформульована математична модель бака-акумулятора суміщеного з теплообмінником при використанні в якості рідинного теплоносія антифризу (для виключення обледеніння системи), в якій для спрощення моделі (зниження порядку) віднесено теплоємність трубок до теплоємності теплоносія в об'ємі трубок, а масу корпусу до маси рідини в ньому. Для створення і аналізу системи автоматичного керування температурним режимом отримані моделі являють собою систему нелінійних рівнянь, розв'язок яких доцільно проводити в комп'ютерних середовищах.

Ключові слова: теплоаккумулятор, рідинний наповнювач, теплоносії, бак з рідиною, температурний режим

Актуальність. Низькотемпературна теплота є основною частиною енергії, яка споживається в стаціонарних процесах агропромислового виробництва. Для

теплопостачання виробничих приміщень найдоцільніша низькопотенційна теплота (будь якого походження), попередньо утилізована в теплових акумуляторах. При використанні теплоти низьких температур (30...90 °С) її вигідно накопичувати у формі теплоти в акумуляторах із твердим або рідким теплоакumuлюючим наповнювачем. Акумулятори теплоти являють собою ємність, теплоізольовану від оточуючого середовища, в якій розміщено теплоакumuляційний матеріал у твердому стані (щебінь, пісок, галька) або рідкому стані (вода, розсіл). Найбільше поширення в аграрному виробництві набули рідинні (водяні) акумулятори теплоти. Перевага рідинних акумуляторів полягає в тому, що теплоакumuлювальна рідина може трансформувати теплоту до споживача без проміжного теплоносія, що виключає додаткові затрати і втрати енергії.

Для автоматизації режимів теплопостачання виробничих об'єктів з використанням короткочасно-періодичного накопичення теплової енергії необхідно мати адекватний математичний опис системи акumuляції теплоти.

Існуючі математичні моделі представляють рідинний теплоакumuлятор як одноємнісний об'єкт, не розділяючи режими заряджання (накопичення теплоти) і розряджання теплоакumuлювальної ємності. Незважаючи на простоту задач моделювання вони є досить актуальними для синтезу і аналізу систем автоматизації режимів теплопостачання технологічних об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Обґрунтування доцільності використання короткочасного та довгострокового акumuлювання низькотемпературної теплової енергії в системах теплопостачання виробничих і побутових приміщень, а також методи розрахунків наведено у фундаментальній праці [1]. Задачі і можливості використання теплових акумуляторів, їх класифікація, види конструкцій і розрахунки досить детально висвітлені в роботах [2-6]. У роботі [7] розглянуто можливості використання акumuлювання теплоти в спорудах закритого ґрунту. У роботі [8] проаналізовано роботу електронагрівача-акumuлятора в режимі розрядження при змінній в часі температурі атмосферного повітря. У роботі [9] наведено моделі рідинного і ґрунтового теплоакumuляторів. У роботі [10]

наведено модель гуртового теплоаккумулятору для теплиці. У загальному плані для різних задач використовують різні форми розрахунку теплоаккумулятора.

Мета дослідження – формулювання математичної моделі динаміки теплового режиму рідинного акумулятора теплоти, як ланки в системі автоматичного керування теплопостачанням виробничого приміщення.

Матеріали і методи дослідження. Специфіка питання, що розглядається, обумовлює аналітичний метод досліджень на основі аналізу фізичного процесу, складання і розв'язку диференціальних рівнянь теплового балансу багатоемнісного об'єкта керування.

Результати досліджень та їх обговорення. Водяні акумулятори ємнісного типу найбільш розповсюджені в системах сонячного опалення та гарячого водопостачання, що пов'язано із суміщенням функцій теплоаккумуляторної речовини і теплоносія. Такі акумулятори є теплоізованим баком з водою, нагрівання якої здійснюється від теплообмінника, в якому протікає нагрітий теплоносії з контуру геліоколектора.

Для підвищення ефективності використання теплового водяного акумулятора необхідно зменшувати втрати теплоти у зовнішнє середовище, тому бак має мати теплоізоляцію корпусу. У більшості випадків баки мають циліндричну форму із співвідношенням висоти до діаметра $HD^{-1} = 3...5$. У випадку, коли в контурі сонячного колектора циркулює антифриз, для нагрівання води використовують теплообмінники, розділяючи теплоносії з водою в акумуляторі. При витратах теплоносія більш як 2000 кг/год рекомендують [11] застосовувати водо-водяні секційні теплообмінники (змійовикові ємності теплообмінники), а при менших витратах – «швидкі» теплообмінники типу «труба в трубі», які працюють за протитечієвою схемою.

Схеми теплоакмулюючих рідинних систем наведено на рис. 1.

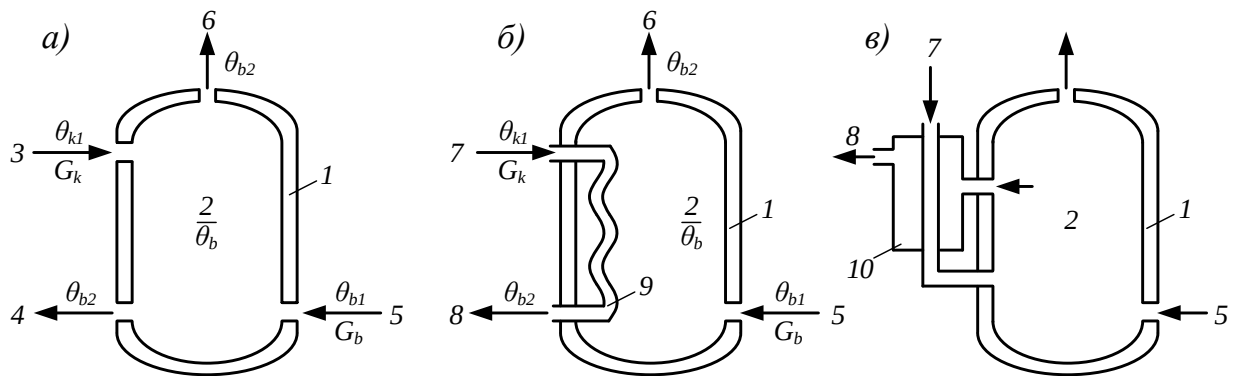


Рис. 1. Схеми бак-акумуляторів теплоти (нагрітої води):

1 – теплоізований корпус; 2 – вода; 3 – підведення нагрітої в геліоколекторі води; 4 – відведення води в колектор; 5 – підведення холодної води; 6 – відведення нагрітої води; 7 – підведення теплоносія (антифриз) до бака від колектора; 8 – відведення теплоносія в колектор; 9 – секційний змійовиковий теплообмінник; 10 – проточний теплообмінник «труба в трубі»

В існуючих теплових розрахунках бака-акумулятора останній представлено як одноємнісний об'єкт [1, 6, 11], за наявності теплоізоляції та супутньої арматури корпус має значну теплову інерцію, яку не можна нехтувати в нестационарних процесах.

Математичну модель визначимо, як двоємнісний об'єкт із зосередженими параметрами.

У бак подається вода з колектора з температурою θ_k та від системи водоспоживання (гарячого) θ_{w1} , а з бака виводиться зворотна вода в колектор та споживачу θ_{b2} ; якщо надходження теплоти з колектора більше витрат споживача, тепло накопичується та температура води збільшується. Частина тепла передається від поверхні ізоляції в оточуюче середовище.

Рівняння теплового балансу для води в ємності бака:

$$m_b c_b \frac{d\theta_{b2}}{d\tau} = G_k c_k \theta_{k1} + G_w c_w \theta_{w1} - (G_k c_k + G_w c_w) \theta_{b2} + \alpha_k^v F_v (\bar{\theta}_b - \theta_k), \quad (1)$$

$$m_k c_k \frac{d\theta_k}{d\tau} = \alpha_k^v F_v (\bar{\theta}_b - \theta_k) + \alpha_k^z F_z (\theta_k - t_z), \quad (2)$$

де $m_b c_b, m_k c_k$ – маса та питома теплоємність води в ємності і матеріалу корпусу ємності; G_k, G_w – масові витрати води через колектор та споживачем гарячої води; θ_{k1}, θ_{b1} – температура на виході колектора та холодної води на підігрівання; t_z – температура зовнішнього середовища; θ_{b2} – температура на виході з бака; $\bar{\theta}_b = 3^{-1}(\theta_{k1} + \theta_{b1} + \theta_{b2})$ – середня температура води в ємності бака; $\alpha_k^v, \alpha_k^z, F_v, F_z$ – коефіцієнт теплообміну із внутрішньою F_v та зовнішньою F_z поверхнями.

Для спрощення моделі можна масу корпусу віднести до маси води в об'ємі бака, тоді динаміку зміни температури води в акумуляторі можна визначити одним рівнянням:

$$(m_b c_b + m_k c_k) \frac{d\theta_{b2}}{d\tau} = G_k c_k \theta_{k1} + G_w c_w \theta_{w1} - (G_k + G_w) c_w \theta_{b2} + kF(\bar{\theta}_b - t_z), \quad (3)$$

де $k = \left(\frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_z} \right)^{-1}$ – коефіцієнт теплопередачі від води до зовнішнього середовища; δ_i, λ_i – товщина теплоізоляції та коефіцієнт теплопровідності ізоляції.

Розглянутий варіант акумулятора використовують в системах сонячного гарячого водопостачання для попереднього нагрівання води.

У двоконтурних системах сонячного опалення та гарячого водопостачання використовують геліоколектори з антифризом, а нагрівання води в теплоакумулювальні ємності реалізують з використанням теплообмінників (рис. 1, б, в).

У таких пристроях бак-акумулятор із теплообмінником змійовиком має чотири теплових ємності: корпус бака, рідина, стінки теплообмінника, теплоносій у трубах. Для спрощення моделі (зниження порядку) можна віднести теплоємність трубок до теплоємності теплоносія в об'ємі трубок, а масу корпусу до маси рідини в ньому. Розрахункова схема бака з теплообмінником наведена на рис. 2.

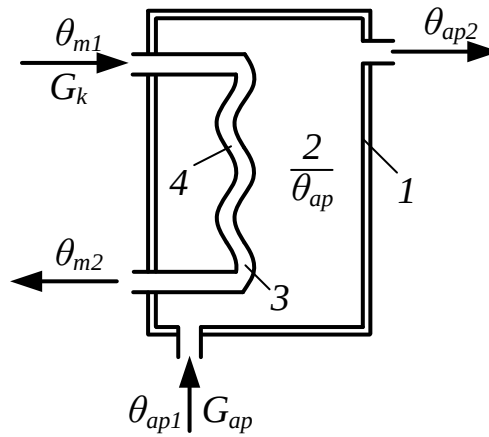


Рис. 2. Розрахункова схема бака-акумулятора з вмонтованим змійовиковим теплообмінником:

1 – корпус бака; 2 – теплоакумулювальна рідина; 3 – труба теплообмінника; 4 – теплоносії в трубі

Модель бака-акумулятора з теплообмінником, що функціонує в режимі нагрівання без відбору теплоти, складено для двох теплоінерційних елементів:

– трубчастого теплообмінника з теплоносієм:

$$(m_{mp}c_{mp} + m_m c_m) \frac{d\theta_{m2}}{d\tau} = G_m c_m (\theta_{m1} - \theta_{m2}) - k_{mp} F_{mp} (\bar{\theta}_m - \theta_{ap}), \quad (4)$$

– бака з теплоакумулювальною рідиною:

$$(m_b c_b + m_{ap} c_{ap}) \frac{d\theta_{ap}}{d\tau} = k_{mp} F_{mp} (\bar{\theta}_m - \theta_{ap}) - k_b F_b (\theta_{ap} - t_z), \quad (5)$$

де m_{mp}, m_m, m_b, m_{ap} – маса труб, теплоносія в трубах, бака, теплоакумулюючої рідини (вода); c_{mp}, c_m, c_b, c_{ap} – питома теплоємність труб, теплоносія в трубах, бака, теплоакумулюючої рідини (вода); G_m – масова витрата теплоносія; k_{mp}, k_b – коефіцієнти теплопередачі від теплоносія до рідини в баку та від рідини в баку до зовнішнього середовища; F_{mp}, F_b – поверхня труб і бака; $\theta_{m1}, \theta_{m2}, \bar{\theta}_m$ – температура теплоносія на вході, виході і середня ($\bar{\theta}_m = 0.5(\theta_{m1} + \theta_{m2})$); t_z – температура оточуючого середовища.

Якщо бак акумулятор працює в режимі відбору теплоти, тобто в режимі кожухо-трубного теплообмінника, рівняння теплового балансу для бака-акумулятора набуває вигляду:

$$\begin{aligned} (m_b c_b + m_{ap} c_{ap}) \frac{d\theta_{ap2}}{d\tau} = G_{ap} c_{ap} (\theta_{ap1} - \theta_{ap2}) + \\ + k_{mp} F_{mp} (\overline{\theta}_m - \theta_{ap}) - k_b F_b (\theta_{ap} - t_z) \end{aligned} \quad (6)$$

де G_{ap} – масові витрати теплоакумулювальної речовини (вода); $\theta_{ap1}, \theta_{ap2}, \overline{\theta}_{ap}$ – температура теплоакумулювальної рідини на вході, виході бака та середнє значення ($\overline{\theta}_{ap} = 0.5(\theta_{ap1} + \theta_{ap2})$).

Отримана система лінійних диференціальних рівнянь (4), (6) визначає зміну в часі температури трубчастого теплообмінника з теплоносієм $\theta_{m2}(\tau)$ і теплоакумулювальної рідини на виході з бака $\theta_{ap2}(\tau)$.

Висновки і перспективи.

1. Сформульовані на основі аналізу теплового балансу елементів конструкцій рідинних теплоаккумуляторів математичні моделі динамічних температурних режимів, що описують зміну температури в часі (перехідний режим) та можуть бути використані для визначення раціональних параметрів їх функціонування.

2. Розроблений спрощений математичний опис перехідного процесу в рідинних теплоаккумуляторах, може бути використаний при синтезі системи автоматичного керування.

Список використаних джерел

1. Корчемний, М. О., Федорейко, В. М., Щербань, В. А. (2001). Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль: Підручники і посібники. 984 с.
2. Левенберг В. Д., Ткач М. Р., Гольстрем В. А. Аккумулирование тепла. К.: «Техника», 1991. 112.
3. Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии (пер. В. М. Бродянского). М.: Мир, 1987. 272 с.
4. Ромье Е. Периодическое аккумулирование тепловой энергии. Регенератор. Теплопередача. 1973. Вып. 101(4). С. 189–196.
5. Валов М. И. Выбор объема бака-аккумулятора в системе гелиотеплоснабжения. Гелиотехника. 1985. №5. С. 47–50.

6. Драганов, Б. Х. Использование возобновляемых и вторичных энергоресурсов в сельском хозяйстве. К.: Вища школа. 1988. 56 с.
7. Шишко Г. Г., Потапов В. О., Сулима Л. Т., Чебанов Л. С. Теплицы и тепличные хозяйства: справочник (под ред. Г. Г. Шишко). К.: Урожай, 1993. 424 с.
8. Котов Б. І., Спирін А. В., Калініченко, Р. А. (2016). Електротепловий спосіб акумуляції енергії для активного вентилявання сільськогосподарської продукції. Техніка, Енергетика, Транспорт АПК. 2016. №1. С. 81–83.
9. Максименко І. М. Автоматизація систем забезпечення заданої температури з альтернативними джерелами енергії: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.07. 19. Одеса, 2017. 19 с.
10. Котов Б. І., Грищенко В. О. (2017). Математична модель динамічних режимів системи утилізації надлишкової і відпрацьованої теплоти з ґрунтовим акумулятором для сільськогосподарських виробничих споруд. Науковий Вісник Національного Університету Біоресурсів і Природокористування України. Серія : Техніка Та Енергетика АПК. 2017. Вип. 261. С. 94–103.
11. Аvezов Р. Р. и др. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения. М.: Стройиздат, 1990. 328 с.

References

1. Korchemnyi, M. O., Fedoreiko, V. M., Shcherban, V. A. (2001). Enerhozberezhennia v ahropromyslovomu kompleksi [Energy saving in the agro-industrial complex]. Ternopil: Pidruchnyky i posibnyky, 984.
2. Levenberg, V. D., Tkach, M. R., Gol'strem, V. A. (1991). Akkumulirovaniye tepla [Heat storage]. Kyiv: «Tekhnika», 112.
3. Bekman, G., Gilli, P. (1987). Teplovoye akkumulirovaniye energii (trans. V. M. Brodyanskogo) [Thermal storage of energy]. Moskow: Mir, 272.
4. Rom'ye, E. (1973). Periodicheskoye akkumulirovaniye teplovoy energii. Regenerator [Periodic accumulation of thermal energy. Regenerator]. Teploperedacha, 101(4), 189–196.
5. Valov, M. I. (1985). Vybory ob'yema baka-akkumulyatora v sisteme gelioteplosnabzheniya [Selection of the volume of the storage tank in the solar heating system]. Geliotekhnika, 5, 47–50.
6. Draganov, B. Kh. (1988). Ispol'zovaniye vozobnovlyayemykh i vtorichnykh energoresursov v sel'skom khozyaystve [Use of renewable and secondary energy resources in agriculture]. Kyiv: Vysshaya shkola. 56.
7. Shishko, G. G., Potapov, V. O., Sulima, L. T., Chebanov, L. S. (1993). Teplitsy i teplichnyye khozyaystva: spravochnik (ed. G. G. Shishko) [Greenhouses and greenhouse facilities: a reference book]. Kyiv: Urozhay. 424.
8. Kotov, B. I., Spirin, A. V., Kalinichenko, R. A. (2016). Elektroteplovyy sposib akumulatsii enerhii dlia aktyvnogo ventilyuvannia silskohospodarskoi produktsii [Electrothermal method of energy storage for active ventilation of agricultural products]. Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK, 1, 81–83.
9. Maksymenko, I. M. (2007). Avtomatyzatsiia system zabezpechennia zadanoi temperatury z alternatyvnymy dzherelamy enerhii [Automation of systems for providing a

given temperature with alternative energy sources]: avtoref. dys... kand. tekhn. nauk: 05.13.07, Odesa, 19.

10. Kotov, B. I., Hryshchenko, V. O. (2017). Matematychna model dynamichnykh rezhymiv systemy utylizatsii nadlyshkovoi i vidpratsovanoi teploty z gruntovym akumulatorem dlia silskohospodarskykh vyrobnychykh sporud [Mathematical model of dynamic modes of the system of utilization of excess and spent heat with soil accumulator for agricultural production facilities]. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Universytetu Bioresursiv i Pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriia : Tekhnika Ta Enerhetyka APK, 261, 94–103.

11. Avezov, P. P. i dr. (1990). Sistemy solnechnogo teplo- i khladosnabzheniya [Solar heating and cooling systems]. Moskow: Stroyizdat, 328.

MODELING THE DYNAMICS OF THERMAL ENERGY ACCUMULATORS AS CONTROL OBJECTS

B. Kotov, V. Hryshchenko, Ye. Pylypenko

Abstract. *The article defines the relevance of research on options for using heat accumulators in the heat supply system of industrial premises. Typical technological schemes of liquid heat accumulators are considered and shortcomings of existing mathematical models are determined. The technological scheme of a capacitive type battery is selected and analyzed, as the most common in solar heating and hot water systems. It has been established that for a non-stationary process, the thermal inertia of the body reinforcement and thermal insulation cannot be neglected, therefore, the storage tank cannot be considered as a single-capacity object. Based on the analysis of the heat balance of structural elements of heat storage devices, a mathematical model of the dynamics of the accumulator tank as a two-capacity object with lumped parameters is formulated. The resulting simplified mathematical model makes it possible to identify the simulation object (a capacitive type water accumulator). In the considered embodiment, the heat accumulator is used in hot solar water supply systems for preheating water. For use in dual-circuit systems of solar heating and hot water supply, heliolectors with antifreeze are used, and water is heated in heat storage tanks using heat exchangers. The formulated mathematical model of a tank of a combined accumulator with a heat exchanger when used as a liquid heat carrier - antifreeze (to exclude icing of the system), in which, to simplify the model (reduce the order), the heat capacity of the tubes is related to the heat capacity of the heat carrier in the volume of the tubes, and the mass of the body to the mass of liquid in it . For the development and analysis of an automatic temperature control system, the obtained models are a system of nonlinear equations, the solution of which is advisable to carry out in computer environments.*

Key words: *heat accumulator, liquid filler, coolant, liquid tank, temperature regime*