

УДК 620.92

С.Л. ГОРЯЩЕНКО, А.І. ГОРДЕЄВ, Є.О. ГОЛІНКА, С.В. УСПАЛЕНКО

Хмельницький національний університет

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОСТІ НАГРІВАННЯ ТА АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛА У СИСТЕМІ "НАГРІВАЧ-РІДИНА-БАК"

В роботі визначено шляхи дослідження параметрів ефективності нагрівання та акумулювання тепла у системі «нагрівач-рідина-бак». Описано експериментальну установку та електричну схему керування установкою для дослідження системи. Для визначення впливу конструктивних параметрів на параметр оптимізації проведено рототабельне планування другого порядку для трифакторного експерименту. Отримано рівняння регресії, яке дозволяє проводити аналіз впливу на параметр оптимізації часу нагрівання, об'єму рідини та площі баку.

Ключові слова: системі «нагрівач-рідина-бак», температура, планування експерименту

S.L. HORIASHCHENKO, A.I. GORDEEV, E.O. GOLINKA, S.V. USPALENKO  
Khmelnitsky national University

### EXPERIMENTAL STUDY OF PERFORMANCE PARAMETERS OF THE HEATING AND HEAT STORAGE IN THE HEATER-LIQUID-TANK"

**Abstract** - The study also identified avenues for research Parmer efficiency of heating and heat storage in the heater-liquid-tank". System the power supply consists of a source of primary energy, the subsystem energy conversion and consumers of the converted energy. In the system, there may be inconsistencies - both in time and in space - between power supply and needs. Overcoming these gaps is the purpose of energy storage. Described the experimental setup and electrical circuit control device for investigation of the system. The results of single-factor experiment on the heating system. An analytical description of the transition process the object "heater-liquid-tank" with the use of analytical and experimental method. To determine the effect of structural parameters on the optimization parameter held rotatable planning of the second order for traffictornado experiment. The resulting regression equation, which allows antz impact on the parameter optimization of heating time, liquid volume and area of Baku.

**Keywords:** the heater-liquid-tank", temperature, experiment planning

#### Вступ

Набуває все більшого значення науково-технічне завдання, пов'язане з підвищенням ефективності використання енергії у споживачів - в промисловості, на транспорті, в сільському господарстві і в побуті.

Тут є великі резерви, використання яких дозволяє економити енергоресурси часто при значно менших витратах, ніж в процесах отримання та перетворення первинної енергії. Встановлено, наприклад, що витрати на будь-які заходи щодо економії палива та електроенергії в 2-3 рази нижчі за витрати на розширення паливно-енергетичної бази. До заходів щодо підвищення ефективності використання енергії у споживачів можна віднести перехід на більш досконалі і менш енергоємні технології, використання вторинних енергетичних ресурсів і, нарешті, вирівнювання тимчасових невідповідностей між виробленою енергією і потребами в ній за допомогою акумулювання енергії.

Відомо, що електрична енергія - сама розповсюджена основна форма енергії, що використовується - піддається акумулюванню поки з найбільшими витратами. Ємність електрохімічних акумуляторів не дозволяє використовувати їх в скільки-небудь великих масштабах; перспективні великі надпровідні накопичувачі електроенергії знаходяться ще в стадії попередніх напрацювань.

Гідравлічні методи акумулювання енергії дозволяють накопичувати значну її кількість, але це пов'язано, з великими капіталовкладеннями і змінами навколишнього середовища, що є не завжди сприятливими. Разом з тим інші, більш прості способи акумулювання енергії - теплові, пневматичні, термохімічні і менш масштабні механічні - детально розроблені і практично перевірені в самих різних умовах. Їх застосування дозволяє вже зараз при відносно невеликих витратах отримати істотну економію як безпосередньо в енергетичних ресурсах, так і побічно завдяки зниженню капітальних витрат на енергетичне обладнання.

Це пов'язано з можливістю зменшення втрат, що виникають у зв'язку з розбіжністю за часом піків і провалів виробництва і споживання енергії, а також з компенсацією короткочасної нерівномірності її витрати в багатьох технологічних процесах, на транспорті і в побуті.

Якщо невідповідності між подачею і потребами в енергії обумовлені видом джерела первинної енергії і установки для перетворення енергії, то завдання акумулюючої установки полягає у вирівнюванні вироблення енергії шляхом зрізання піків і заповнення провалів вироблення.

Централізоване акумулювання в системі електропостачання може бути тепловим або механічним. Децентралізоване акумулювання може бути як тепловим, здійснюваним закачуванням теплоносія, так і пневматичним або гідравлічним; крім того, воно може здійснюватися безпосереднім акумулюванням електричної енергії за допомогою електрохімічних і електромагнітних акумуляторів або електричних конденсаторів. Акумулювання енергії у споживача може бути тепловим, електрохімічним або механічним.

Повна оцінка установки акумулювання енергії включає не тільки економічне порівняння різних можливих систем акумуляторів і пікових установок, але й оптимізації підсистем акумулювання в системі енергопостачання. Іноді такі зовсім не економічні чинники, як маневреність, зручність застосування, експлуатаційні переваги, будуть визначальними при виборі тих чи інших акумуляторів установок.

Слід зазначити, що при оптимізації акумулюючої установки необхідно володіти докладною інформацією про споживання енергії та його зміни в часі і проявити навіть більше обачності, ніж при оптимізації чисто перетворювальної установки без акумулятора.

Капітальні витрати на теплоакумулюючу установку мають складову, яка залежить від її ємності, і складові, які залежать від потужності (зарядки і розрядки).

### Мета роботи

Мета проведення експериментальних досліджень полягає в перевірці достовірності одержаних математичних залежностей, а також правильності прийнятих теоретичних припущень для визначених факторів, що суттєво впливають на характер процесу акумуляції тепла. А саме: час нагрівання рідини в баку, часу теплопередачі між теплообмінником та рідиною, властивостей рідини та матеріалу ізоляції, кількість накопиченого тепла, час теплопередачі тепла з баку на опалення побутового приміщення.

Робота теплоакумулятора (об'єкта «нагрівач-рідина-бак») пов'язана з періодами нагрівання та охолодження робочої рідини. Аналітичні дослідження дозволяють виконати кількісну оцінку часу нагрівання рідини до максимальної та час віддачі тепла на зовні. Відносно відхилення часових ліній може призвести до виснаження теплоакумулятора. Тому визначення параметрів об'єкта які впливають на час накопичення та часу віддачі тепла і визначає основну задачу досліджень.

### Основна частина

Будь-яка система постачання енергії складається з джерела первинної енергії, підсистеми перетворення енергії й споживачів перетвореної енергії. У системі можуть виникнути невідповідності - як у часі, так і в просторі- між подачею енергії й потребами. Подолання цих невідповідностей є основною метою акумулювання енергії [1-3]. Якщо такі невідповідності викликаються змінами (більш-менш різкими) у споживанні енергії, то це завдання зняття пікового навантаження, що може бути вирішена, принаймні частково, за допомогою акумулювання енергії. Установка для акумулювання енергії може виявитися дешевше пікової енергетичної установки. Крім того, при її застосуванні можуть бути знижені витрати на паливо (незважаючи на деякі втрати в акумуляторі), тому що для зарядки акумулятора може бути використаний надлишок енергії від установок базисного навантаження з низькою вартістю палива.

Для проведення експериментальних досліджень, було спеціально спроектовано і виготовлено експериментальну установку, яка дозволяє визначити енергію та час нагрівання робочої рідини у теплоакумуляторі. Загальний вигляд установки для дослідження теплоакумулятора показано на рис.1.



Рис. 1. Загальний вигляд установки для дослідження теплоакумулятора

Експериментальна установка складається з теплового акумулятора об'ємом 500 літрів. В бак теплоакумулятора введено кілька теплообмінників які зав'язані на один вхід та один вихід. Кожен з теплообмінників вмикається окремо, за конструкцією та площею вони ідентичні. Зверху всередині бака розташовано теплообмінник для опалення, що підключено до батареї опалення через насос. Нагрівачем води є електродний котел на 25 кВт. Окрема плата управління та контролю управляє включенням та виключенням котла та здійснює контроль температури по вбудованих в теплоакумулятор датчиків температури.

Установка [4-5] працює наступним чином. Після включення живлення виставляється температура, до якої повинен нагрітися бак теплоакумулятора (це  $95^{\circ}\text{C}$ ). Електродний котел вмикається і насос в контурі нагріву починає перемішувати нагріту воду. Нагріта вода через теплообмінники віддає тепло до теплоакумулятора та повертається знову до котла де й нагрівається знову. Завдяки використанню електродного котла вода в контурі нагріву максимально може нагріватися до  $99^{\circ}\text{C}$ . Конструктивно більший нагрів її неможливо здійснити через особливості електродного нагріву. Таким чином ми маємо стабільне значення вхідних параметрів теплоносія. Окрім того відсутня можливість пароутворення та створення

небезпечної ситуації до ураження перегрітим паром людей у приміщенні, де розташовано систему опалення з баком. Нагріта майже до кипіння вода віддає свою теплову енергію воді, що знаходиться в баку-акумуляторі. Сам бак оснащено, на всякий випадок, системою зі зворотнім клапаном. Нагріта вода природною конвекцією розповсюджується в теплоакумуляторі. Використання теплоізоляційних матеріалів дозволило зменшити втрати тепла. Нагріта вода може відразу, або через певний проміжок часу віддати свою теплову енергію контуру опалення. Для цього вмикається насос і через верхній теплообмінник здійснюється відбор гарячої води та віддача тепла в навколишнє середовище через батарею опалення. Регулюючи час вмикання та вимикання насоса можна контролювати кількість тепла, що надходить до батареї опалення.

Експериментальна установка обладнана електронною системою (рис.2), що дозволяє контролювати та реєструвати біжучі значення температури та часу нагрівання баку та охолодження його.

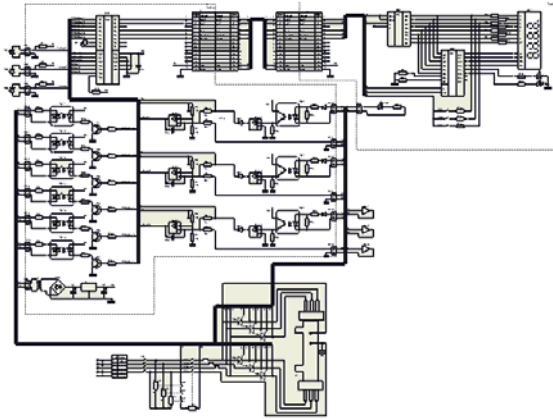


Рис. 2. Електрична схема керування установкою для дослідження теплоакумулятора

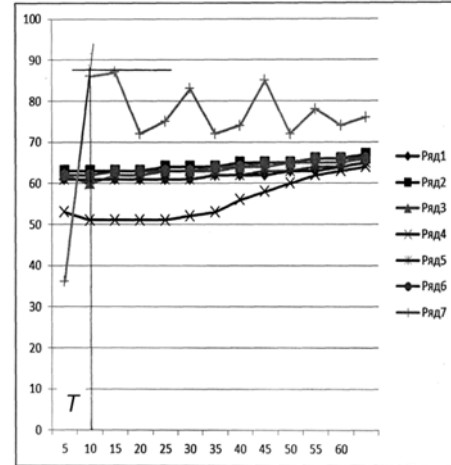


Рис. 3. Графіки залежностей температури згідно вимірювань датчиками системою управління та контролю під час виходу теплоакумулятора на номінальний режим роботи

Отримання точного описання об'єкта «нагрівач-рідина-бак» аналітичним методом має значні труднощі, а саме необхідно врахувати усі процеси, які проходять в об'єкті та записати систему нелінійних диференціальних рівнянь. Точний опис об'єкта ускладнюється, бо більшість процесів за своєю природою є нелінійні.

Для отримання аналітичного опису об'єкту «нагрівач-рідина-бак» запропоновано застосувати аналітично-експериментальний метод із застосуванням лінійних диференціальних рівнянь. Значення сталих коефіцієнтів функції, якою описується рішення, зв'язано відомими співвідношеннями з коефіцієнтами диференціального рівняння і його можна визначити із допомогою графоаналітичної обробки кривої перехідного процесу. Але такий метод дає оцінку процесу із значним наближенням. Виходячи з характеру кривої розігріву (Рис.3) об'єкт «нагрівач-рідина-бак» відноситься до аперіодичної ланки першого порядку. У цьому випадку диференціальне рівняння та його рішення мають вигляд:

$$T \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = K \cdot \mu \quad \varphi_{(t)} = k \cdot \mu (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (1)$$

де  $T$  – стала часу;

$t$  – поточне значення часу;

$e$  – число Ейлера. ( $e = 2,81$ ).

$$\varphi_i = \frac{y_i - y_0}{y_0}, \quad (2)$$

де  $\varphi_i$  - значення відносної координати в даний момент;

$y_i$  - величина вихідної координати після введення збурення в фіксований момент;

$y_0$  - величина вихідної координати до введення збурення.

$$\mu_i = \frac{x_i - x_0}{x_0}, \quad (3)$$

де  $\mu_i$  - вихідна величина збурення, діючого в даний момент часу;

$x_i$  - величина вхідної координати після ведення збурення;

$x_0$  - величина вхідної координати до ведення збурення.

Коефіцієнт підсилення  $k_i$  визначається відношенням:

$$k_i = \frac{\varphi_i}{\mu_i}, \tag{4}$$

У результаті проведеного експериментального вимірювання процесу нагрівання системи «нагрівач-рідина-бак» (рис.3) та проведеного графічного оброблення отримано коефіцієнти диференційного рівняння.

$$T \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = K \cdot \mu \tag{5}$$

Отримана аналтична модель дає можливість аналізувати перехідні процеси які проходять в об'єкті «нагрівач-рідина-бак», але для визначення впливу різних конструктивних параметрів на процес нагрівання об'єкту «нагрівач-рідина-бак» було проведено дослідження з використанням математичних методів планування і аналізу експерименту, що дозволить уникнути недоліків, що властиві однофакторним методам дослідження.

Параметром оптимізації була прийнята температура в теплоаккумуляторі. Цей параметр оптимізації повністю відповідає вимогам, що висуваються до параметрів оптимізації при плануванні експерименту [9].

Для отримання уточненої моделі (параметра оптимізації) запропоновано використовувати алгебраїчний поліном другого порядку [13]:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < l \leq k} b_{il} x_i x_l + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2, \tag{6}$$

де  $b_i, b_{il}, b_{ii}$  - коефіцієнт регресії;

$x_i, x_l$  - змінні фактори.

В зв'язку з цим було прийняте рішення проводити експеримент, використовуючи некомпозиційне рототабельне планування другого порядку. Для запису умов експерименту і обробки експериментальних даних рівні факторів кодувались. Прийнято рототабельне планування другого порядку для трифакторного експерименту. Прийняті наступні змінні фактори: значення площі теплообмінника –  $X_1$ ; час нагрівання –  $X_2$ ; кількість рідини –  $X_3$ .

При кодуванні значень  $X_1, X_2$  і  $X_3$  верхній рівень позначають +1, нижній –1, а основний 0. Кодування фактора  $x_i$  визначається виразом [136]:

$$x_i = \frac{X_i^n - X_{i0}^n}{\varepsilon_i}, \tag{7}$$

де  $i$  - номер фактору;

$X_i^n$  - натуральне значення  $i$ -го фактору;

$X_{i0}^n$  - натуральне значення основного рівня  $i$ -го фактору;

$\varepsilon_i$  - інтервал зміни  $i$ -го фактору.

Фактори і їх кодовані значення наведені в табл. 1. Значення  $X_{31}$  відноситься до температури внизу теплоаккумулятора,  $X_{32}$  – температура в середині теплоаккумулятора,  $X_{33}$  – температура вверху теплоаккумулятора.

Таблиця 1

**Рівні та інтервали зміни факторів**

Найменування	$X_1, \text{ м}^2$	$X_2, \text{ хв.}$	теплоаккумулятор		
			низ	середина	верх
			$X_{31}, \text{ м}^3$	$X_{32}, \text{ м}^3$	$X_{33}, \text{ м}^3$
Інтервал зміни	0,06	30	0,15	0,15	0,15
Рівні факторів:					
- 1	0,06	30	0,20	0,20	0,20
0	0,12	60	0,35	0,35	0,35
1	0,18	90	0,5	0,5	0,5

Значення були перевірені на однорідність дисперсій похибок по критерію Кохрена [13]. Коефіцієнти рівняння регресії (6) знаходилися за допомогою матричного методу [9], а також перевірялась їх значимість по довірчих границях за допомогою критерію Стьюдента при 5% рівні значимості [9]. Виявлена однорідність проведених досліджень.

Проводячи регресійний аналіз і перевіряючи адекватність моделі по критерію Фішера [13] були одержані рівняння регресії. Для одержання натуральних рівнянь підставляємо значення кодованого фактора  $X$ , згідно з виразом (7) в отримані рівняння і одержуємо функції залежності часу нагрівання рідини.

Експериментальні дослідження температури нагрівання рідини були проведені для певного значення. Дослідження проводились на рівнях та з інтервалами, які представлені в табл. 1.

Проведена обробка експериментальних даних дозволила отримати параметр оптимізації

(температура), який залежить від факторів (площі теплообмінника, часу та об'єму речовини) для трьох рівнів.

Після проведення експерименту та оброблення отриманих результатів були отримано рівняння регресії:

$$T_{f1}(S, t, v) = 30.1 + 12.15p + 27.85t - 1.05v - 9.67pt - 37.05vt - 13.45pv - 20.52p^2 + 90.19t^2 + 14.46v^2 \quad (8)$$

де  $S = \frac{S - 128000}{72000}$  - приведення значення площі теплообмінника;

$t = \frac{T - 30}{15}$  - приведення значення часу нагрівання;

$v = \frac{V_p - 0.0000015}{0.0000005}$  - приведення значення кількості рідини.

Отримане рівняння регресії дозволяє описувати процес зміни температури з урахуванням всіх трьох факторів.

З представлених графіків видно, що аналітична модель та отримані регресійні залежності з коефіцієнтами задовільно узгоджуються (відносно відхилення експериментальних значень від теоретичних не перевищує для низу - 14%; для середини - 12%; для верху - 13%), що підтверджує правомірність допущень, які були прийняті при обґрунтуванні аналітичної моделі процесу нагрівання.

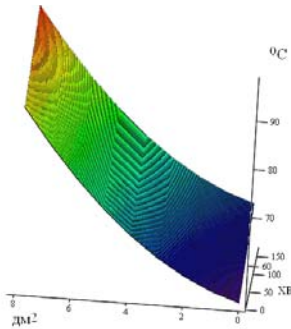


Рис. 4. Графік залежності нагрівання теплоносія від часу нагріву (хв.) та площі теплообмінника (дм<sup>2</sup>)

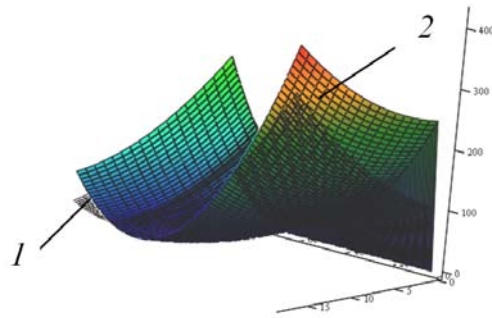


Рис. 5. Графік розповсюдження тепла в теплоаккумуляторі: 1 – теоретичний, 2 – експериментальний

### Висновки

Розбіжності математичної моделі і результатів дослідів обумовлені неминучою помилкою експерименту, а також деякою невідповідністю математичної моделі, в наслідок прийнятих при аналітичному дослідженні положень для спрощення.

З отриманих результатів у вигляді графіків встановлено, що збільшення кількості рідини та площі веде до скорочення часу нагрівання, яке обумовлено фактичною площею теплообмінника. Таким чином, отримане рівняння регресії з достатньою для розрахунків точністю описує процес нагрівання теплоносія в теплоаккумуляторі. Це дозволяє використовувати отримані залежності для розрахунків конструктивних та технологічних параметрів побутового теплоаккумулятора.

### Література

1. Табунщиков Ю.А. Энергоэффективные здания / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач, Н.В. Шилкин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с.
2. Forsstrom J. P., Lund P. D., Routti J. T. Economic analysis of heat storage in energy systems // International Journal of Energy Research Volume 11, Issue 1, pages 85–94, January/March 1987
3. Hazami, M., S. Kooli, M. Lazaar, A. Farhat and A. Belghith, 2005. Thermal Performance of a Solar Heat Storage Accumulator Used For Greenhouses Conditioning. Am. J. Environ. Sci., 1: 270-277 сс.
4. Патент №91482 Україна, F24D 11/00. Система опалення приміщень / Г.Б. Параска; С.Л. Горященко; В.Р. Любчик; А.В. Вітюк; заявник і патентовласник Хмельницький національний університет; опубліковано 10.07.2014, Бюл. № 13/2014 – 5 с.
5. Патент №99525, Україна. F24D 15/02, F24D 11/00 Теплоаккумулятор з теплоізолюючою перетинкою / С.Л. Горященко, Г.Б. Параска, А.В. Вітюк, В.Р. Любчик; заявник і патентовласник Хмельницький національний університет; опубліковано 10.06.2015, Бюл. № 11/2015 – 4 с.

Рецензія/Peer review : 16.8.2016 р.

Надрукована/Printed :28.10.2016 р.  
Рецензент : к.т.н., доц. Поліщук О.С.