

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2019.3\(477\).4](https://doi.org/10.15589/znp2019.3(477).4)
УДК 662.995: 662.997

**ENERGY EFFICIENT OPERATIONAL PROCESSES
OF ADSORPTIVE HEAT STORAGE DEVICE BASED ON COMPOSITE
“SILICA GEL – SODIUM SULPHATE”**

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ПРОЦЕСИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АДСОРБЦІЙНОГО
АКУМУЛЯТОРА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ КОМПЗИТНОГО
АДСОРБЕНТУ «СИЛІКАГЕЛЬ – НАТРІЙ СУЛЬФАТ»**

Olena A. Bielianovska

belyanovskaya@voliacable.com
ORCID: 0000-0003-1873-4574

Roman D. Lytovchenko

roma788553@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1725-2138

Kostiantyn M. Sukhyi

ksukhyi@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4585-8268

Anton E. Buzov

mrtovu@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7938-4670

Mykhailo P. Sukhyi

kafenergy@ukr.net
ORCID: 0000-0002-3906-4592

О. А. Бєляновська,

канд. техн. наук, доцент

Р. Д. Литовченко,

аспірант

К. М. Сухий,

докт. техн. наук, професор

А. Є. Бузов,

студент

М. П. Сухий,

канд. техн. наук, професор

*State Higher Education Institution “Ukrainian State University of Chemical Engineering”, Dnipro
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро*

Abstract. The present work is focused on the performance of the adsorptive heat storage device based on the composite adsorbent “silica gel – sodium sulphate” for the decentralized heating system. The following algorithm for calculating of the efficiency factor of adsorptive heat storage device is proposed calculation of the volume of air passed through the adsorbent layer, absolute humidity of air on the outlet of heat storage device, adsorption, heat of adsorption, operational inputs, such as heating the adsorbent up to the temperature of the beginning adsorption. The correlation of the adsorbent composition and the design characteristics of the heat storage unit has been revealed. The most efficient thermal accumulators are shown to be based on a composite, such as 80% sodium sulphate and 20% silica gel, which corresponded with the maximal values of the limit adsorption. Simulation of the performance of heat storage device based on the composites “silica gel – sodium sulphate” was carried out in the conditions of a typical heating system of residual premises. It has been shown that with steam moistening, the maximal values of the efficiency factor are observed when maximal value of adsorption achieved, the temperature of the humid airflow of 50–60 °C, the relative humidity of 55–60%, airflow speed of 0,4–0,6 m/s. For the first time the structure of inputs for the performance of an adsorptive heat energy storage device was analyzed for steam and ultrasonic moistening. For the first time expediency of the ultrasonic moistening was shown as a method to increase the efficiency of the adsorptive heat storage device. The optimal operational parameters of the adsorptive heat storage device under ultrasonic humidifying: the airflow speed is of 0,2–0,4 m/s and the relative humidity is 40–60%. These parameters allows to enhance the efficiency of the adsorptive heat storage device. Results of the present study can be used to develop energy efficient systems of decentralized heat supply, as well as ventilation and air conditioning.

Key words: adsorptive heat storage device; coefficient of efficiency; heat of adsorption; composite adsorbent.

Анотація. Робота присвячена дослідженню експлуатаційних характеристик адсорбційного акумулятора теплової енергії на основі композитного адсорбенту «силікагель – натрій сульфат» для системи децентралізованого теплопостачання. Пропонується такий алгоритм розрахунку коефіцієнта корисної дії адсорбційного теплоакumuлюючого пристрою: обчислення обсягу повітря, який пройшов через шар теплоакumuлюючого матеріалу, концентрації води в повітрі на виході з теплового акумулятора, адсорбції, теплоти адсорбції, витрат на експлу-

атацію теплоакумулюючого пристрою, які включають підігрів адсорбенту до температури початку адсорбції, підігрів води до температури випаровування, випаровування води та десорбцію, та визначення коефіцієнта корисної дії. Виявлено кореляцію складу адсорбенту та конструктивних характеристик теплоакумулюючого пристрою. Показано, що найбільш ефективні теплові акумулятори на основі композита, який містить 80% натрій сульфату та 20% силікагелю, що відповідає найбільшій граничній адсорбції. Проведено моделювання процесів експлуатації адсорбційних теплових акумуляторів на основі композитів «силікагель – натрій сульфат» в умовах типової системи тепlopостачання житлових приміщень. Виявлено, що за парового зволоження максимальні значення коефіцієнта корисної дії, які відповідають граничній адсорбції, спостерігаються за температур пароповітряного потоку 40–60 °С, відносною вологості повітря 55–60% та швидкості потоку вологого повітря 0,4–0,6 м/с. Уперше проаналізовано структуру витрат на експлуатацію адсорбційного теплоакумулюючого пристрою за парового й ультразвукового зволоження повітря. Уперше показана доцільність використання ультразвукового зволоження повітря як заходу з підвищення ефективності адсорбційного теплоакумулюючого пристрою. Встановлені оптимальні умови експлуатації адсорбційного теплового акумулятора за ультразвукового зволоження повітря: швидкість потоку вологого повітря – 0,2–0,4 м/с, її відносна вологість – 40–60%, які дозволяють експлуатувати теплоакумулюючий пристрій із максимальними значеннями коефіцієнта корисної дії. Результати проведеного дослідження можуть бути використані під час розроблення енергоефективних систем децентралізованого тепlopостачання, а також вентиляції та кондиціонування.

Ключові слова: адсорбційний тепловий акумулятор; коефіцієнт корисної дії; теплота адсорбції; композитний адсорбент.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Зростання вартості первинного палива та, як наслідок, збільшення тарифів на тепlopостачання потребують розроблення заходів із підвищення енергоефективності теплових агрегатів, а також максимально повного використання всіх можливих енергоресурсів, зокрема низькопотенційних.

У цих умовах перспективним технічним рішенням є адсорбційні перетворювачі теплової енергії. У Нідерландах розроблена геліоустановка з адсорбційним модулем для тепlopостачання житлових приміщень [1]. Як теплоакумулюючий матеріал поряд із солями були випробувані цеоліт і силікагель.

Водно час експлуатаційні характеристики адсорбційних модулів для поглинання, зберігання або перетворення теплової енергії визначаються адсорбційними властивостями адсорбентів, які використовуються, зокрема граничною адсорбцією та температурою регенерації.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Застосування адсорбентів у системах опалювання, кондиціонування і вентиляції житлових приміщень пропонувалося в останні кілька десятиліть [2; 3]. Як адсорбційний матеріал пропонували, наприклад, силікагель або цеоліти, температура регенерації яких перевищує 100 °С [4]. Більш низьку температуру регенерації (60–100 °С) мають сілікоалюмінофосфати [5], але їхня сорбційна ємність дорівнює приблизно 0,25 г/г [5], що, вочевидь, вимагає значної маси адсорбенту для покриття теплового навантаження в умовах систем тепlopостачання та вентиляції, що призводить до значного об'єму адсорбційного модуля.

Перспективними для акумулювання теплової енергії могли б бути робочі пари $\text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$, $\text{SrBr}_2 -$

H_2O , $\text{Na}_2\text{S} - \text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$, що дозволяють реалізувати густину запасання енергії 1,9–2,7 ГДж/м³ кристалогідрату [1]. Однак фізична і хімічна нестабільність, а також корозійна активність даних солей за високих температур із нестабільністю за багаторазового циклювання, деградацією в часі, слабкорозвиненою поверхнею теплообміну обмежує їх застосування. Наприклад, необоротний гідроліз магній хлориду за експлуатації адсорбційного пристрою відкритого типу за підвищеної температури вимусив замінити його на цеоліт 13X. Дані проблеми є типовими для будь-якої масивної солі.

Більш перспективними матеріалами виявляються композитні адсорбенти типу «сіль у поринній матриці». Такі матеріали проявили себе не лише як перспективні матеріали для акумулювання і трансформації теплової енергії в системах тепlopостачання, а й як водні буфери в системах вентиляції. Так, адсорбційний регенератор теплоти та вологи на основі композита SWS-1A (оксид алюмінію, який імпреговано кальцій хлоридом) виявляє кращі експлуатаційні характеристики, зокрема порівняно із пристроями на основі традиційних діоксиду кремнію або оксиду алюмінію [7]. У зв'язку із цим спроби вдосконалення адсорбційних теплоаккумулюючих матеріалів орієнтовані переважно на вибір серед існуючих адсорбентів [1] або синтез і дослідження композитних сорбентів «сіль у пористій матриці» унаслідок підвищеної сорбційної ємності до звичайних робочих рідин [8], а також стабілізації солі завдяки розподілу в пористій матриці [9].

Незважаючи на перспективність композитів типу «сіль у пористої матриці» для поглинання, акумулювання і трансформації теплової енергії в системах тепlopостачання та вентиляції [10; 11], широка комер-

ціалізація таких пристроїв обмежена не лише дорогими та складними технологіями імпрегування, які не завжди дозволяють отримувати адсорбент із граничною адсорбцією, яка більше 0,5 кг/кг, що призводить до великих обсягів адсорбційних модулів.

Також перехід від лабораторного прототипу до установки для практичного застосування в умовах систем теплопостачання вимагає математичної моделі, яка дозволяє оцінити ефективність приладу, базуючись на всіх стадіях експлуатації пристрою. Водночас більшість математичних моделей обмежуються лише процесами тепло- та масопереносу під час адсорбції, тобто розряду теплоакumuлюючого пристрою, що не дозволяє надати інтегральну характеристику ефективності його експлуатації [12; 13]. Такі алгоритми розроблялись переважно для ємнісних пристроїв [14]. Тому стає актуальним завдання розробки алгоритму розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного акумулятора теплової енергії.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

У зв'язку з вищесказаним необхідне комплексне дослідження, спрямоване на вивчення експлуатаційних характеристик адсорбційного акумулятора теплової енергії та розроблення математичної моделі процесів експлуатації даного пристрою.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Головна мета роботи – виявити експлуатаційні характеристики адсорбційного акумулятора теплової енергії на основі композита «силікагель – натрій сульфат». Для досягнення зазначеної мети поставлено такі завдання:

- розробити алгоритм розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного акумулятора теплової енергії;
- виявити кореляцію характеристик адсорбенту, параметрів процесів експлуатації та коефіцієнта корисної дії адсорбційного теплового акумулятора на основі композита «силікагель – натрій сульфат»;
- визначити технологічні параметри, які відповідають найбільш ефективній експлуатації даного пристрою.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі адсорбційного акумулятора теплової енергії відкритого типу, який підігріває холодне припливне повітря. Конструктивне виконання адсорбційного теплоакumuлюючого пристрою відкритого типу представлено на рис. 1. Експлуатацію здійснюють згідно зі двостадійним режимом, тобто такими, що періодично змінюють один одного, розряду (адсорбція) та заряду (регенерація адсорбенту, тобто десорбція). Як робоча речовина використовується вода. На першій стадії за допомогою компресора 3 повітря з

навколишнього середовища подають у зволожувач 4, де його відносна вологість підвищується до 30–80%. Далі зволожене повітря нагрівають за допомогою електричного резистивного нагрівального елемента 5, до температури не менш як 30 °С. Далі зволожене повітря поступає до шару адсорбенту.

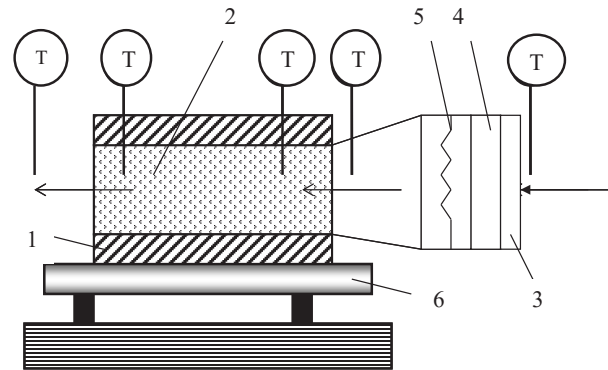


Рис. 1. Експериментальна установка для дослідження теплоакumuлюючих матеріалів. 1 – теплоізолюючий корпус; 2 – теплоакumuлюючий матеріал; 3 – компресор; 4 – зволожувач; 5 – резистивний нагрівальний елемент; 6 – терези [15]

Відбувається адсорбція води з повітря, яке подається в теплоакumuлюючий матеріал, що є екзотермічним процесом, що сприяє зростанню температури як теплоакumuлюючого матеріалу, так і повітря. Температура повітря на виході з теплоакumuлюючого пристрою підвищується до 90–115 °С. Друга стадія, тобто регенерація адсорбенту, відбувається шляхом подачі гарячого повітря, що приводить до нагрівання адсорбенту до температур не нижче 90 °С, отже, до десорбції.

Коефіцієнт корисної дії (далі – ККД) розраховували за запропонованим алгоритмом, %:

$$\eta = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_3} \cdot 100, \quad (1)$$

де $Q_{\text{кор}}$ – корисна теплота (теплота адсорбції), кДж:

$$Q_{\text{кор}} = M_{\text{адс}} \cdot \Delta H_{\text{адс}}, \quad (2)$$

де $M_{\text{адс}}$ – маса адсорбенту, кг; $\Delta H_{\text{адс}}$ – теплота адсорбції, кДж/кг; Q_3 – витрати теплоти, кДж, які за парового зволоження повітря розраховуються як:

$$Q_3 = Q_{\text{адс}} + Q_{\text{корп}} + Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{вип}}^{\text{води}} + Q_{\text{дес}} + Q_{\text{адс}}^{\text{води}}, \quad (3)$$

де $Q_{\text{адс}}$, $Q_{\text{корп}}$, $Q_{\text{нагр}}$, $Q_{\text{вип}}^{\text{води}}$, $Q_{\text{дес}}$, $Q_{\text{адс}}^{\text{води}}$ – відповідно, на кожній стадії, витрати теплоти для нагріву адсорбенту, корпусу установки, нагрівання води в баку, випаровування води в баку, десорбції, нагрівання адсорбованої води, кДж.

Утворення потоку вологого повітря може відбуватися і шляхом ультразвукового зволоження. Тоді роз-

рахунок витрат на експлуатацію теплоакумлюючого пристрою може здійснюватись відповідно до формули:

$$Q_3 = Q_{\text{адс}} + Q_{\text{корп}} + N \cdot \tau + Q_{\text{дес}} + Q_{\text{адс}}^{\text{води}}, \quad (4)$$

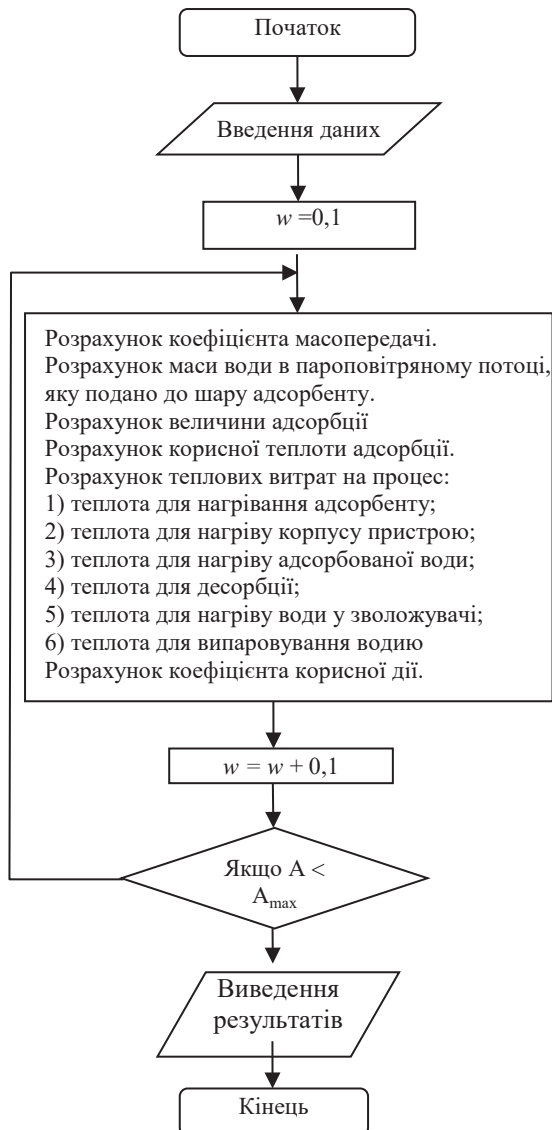


Рис. 2. Блок-схема алгоритму розрахунку коефіцієнта корисної дії адсорбційного теплового акумулятора відкритого типу

де N – потужність ультразвукового зволожувача, кВт; τ – тривалість його роботи, с.

Кількість теплоти, необхідна для нагрівання матеріалу і деталей пристрою, розраховували за загальновідомою формулою:

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta t. \quad (5)$$

Витрати на випаровування води визначали як добуток маси води, яку подано до шару теплоакумлюючого матеріалу (адсорбенту) $M_{\text{H}_2\text{O}}$ та теплоти випаровування $\Delta H_{\text{вип}}$:

$$Q_{\text{вип}}^{\text{води}} = M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta H_{\text{вип}}. \quad (6)$$

Вплив швидкості руху пароповітряної суміші на коефіцієнт корисної дії врахований уведенням в розрахунок коефіцієнта A , який показує величину адсорбції, кг/кг. Цей коефіцієнт використовували під час розрахунку витрат теплоти на десорбції:

$$Q_{\text{дес}} = \Delta H_{\text{дес}} \cdot M_{\text{адс}} \cdot A, \quad (7)$$

а також на нагрівання адсорбованої води:

$$Q_{\text{сор}}^{\text{води}} = M_{\text{адс}} \cdot A \cdot C_{\text{в}} \cdot (t_{\text{пер}} - t_{\text{н.с.}}), \quad (8)$$

де $\Delta H_{\text{дес}} = 2850$ – теплота десорбції, кДж/кг.

Величину адсорбції визначали як:

$$A = \frac{C_0 - C}{M_{\text{адс}}} \cdot V_{\text{пов}}, \quad (9)$$

де $V_{\text{пов}}$ – об'єм повітря: $V_{\text{пов}} = F_{\text{адс}} \cdot w \cdot \tau$, м³; w – швидкість пароповітряного потоку, м/с; $F_{\text{адс}}$ – площа перерізу теплового акумулятора, м². C – абсолютна вологість пароповітряного потоку на виході з теплового акумулятора [15]:

$$C = \frac{C_0}{\frac{[\beta \frac{(-\tau \cdot w \cdot C_0) + H]}{A_{\text{max}}} + 1]}{e^{\frac{C_0}{w}} + 1}}, \quad (10)$$

де τ – тривалість адсорбції, с; C_0 – абсолютна вологість пароповітряного потоку на вході в тепловий акумулятор, кг/м³; H – шару адсорбенту, м;

Таблиця 1. Результати розрахунку теплоти адсорбції і маси сорбенту за теплового навантаження на підігрів припливного повітря 418,23 МДж/добу

Вміст силікагелю, %	Вміст Na ₂ SO ₄ , %	Величина максимальної адсорбції, A _{лім} , кг/кг	ΔH _{адс} , кДж/кг	M, кг	V, м ³
20	80	1,046	3486,67	118,80	0,165
40	60	0,822	2740,00	151,17	0,212
60	40	0,598	1993,33	207,80	0,289
80	20	0,374	1246,70	332,25	0,461

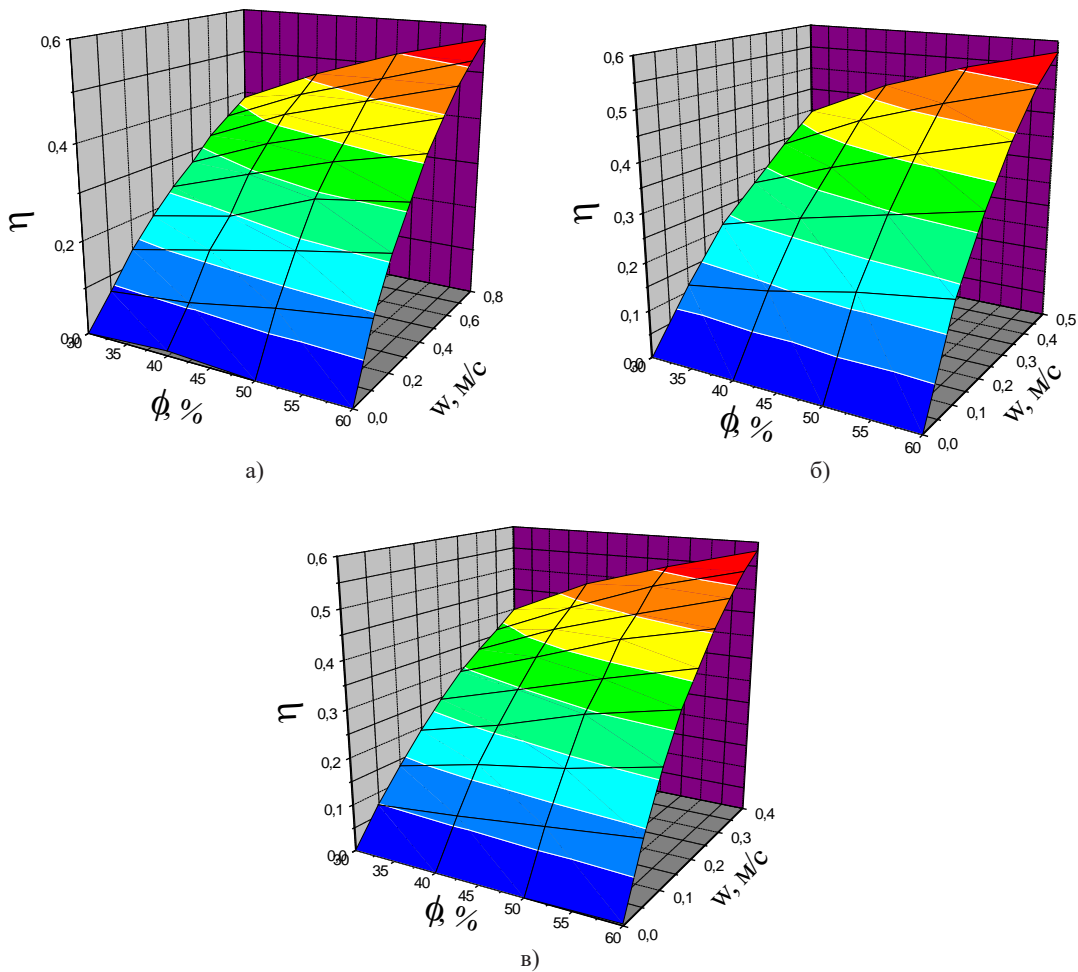


Рис. 3. Залежність коефіцієнта корисної дії від швидкості пароповітряного потоку за відносної вологості 30–60% і температур, °С: а – 40; б – 50; в – 60. Товщина шару адсорбенту – 0,5 м

A_{\max} – адсорбційна ємність теплоакуючого матеріалу, кг/кг; β – коефіцієнт масопередачі, s^{-1} , який визначено згідно із залежністю [15]:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{1}{\beta_n} + \frac{1}{\beta_{np}}, \quad (11)$$

де β_y , β_n та β_{np} – коефіцієнти масовіддачі в газовій фазі, у порах та повздовжнього перемішування [15].

Маса води, яка подана до шару адсорбенту, може бути прийнята відповідною граничній адсорбції:

$$M_{H_2O} = A_{\max} \cdot M_{адс.}, \quad (12)$$

або добуток об’єму повітря, що пройшов через теплоакуючий матеріал, $V_{пов}$ і абсолютної вологості пароповітряного потоку на вході до шару адсорбенту C_0 :

$$M_{H_2O} = V_{пов} \cdot C_0. \quad (13)$$

Блок-схема доповненого алгоритму, яка розроблена відповідно до даної методики розрахунку, представлена на рис. 2.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Пропонується використовувати адсорбційний тепловий акумулятор у системі децентралізованого опалювання приватного будинку загальною площею 95,85 m^2 , висотою 2,5 м. Теплове навантаження на підігрів припливного повітря дорівнює 418,23 МДж/добу. Результати розрахунку маси й об’єму композита «силікагель – натрій натрій сульфат» для покриття цього навантаження наведені в таблиці 1.

Згідно з результатами наведеного розрахунку, найменші маса й об’єм адсорбенту, вочевидь, відповідають композиту, що містить 20% силікагелю і 80% натрію сульфату. Тому даний адсорбент далі використано як адсорбційний матеріал.

Далі було проведено математичне моделювання процесів експлуатації адсорбційного регенератора в умовах типового житлового приміщення. Результати розрахунків наведені на рис. 3. Максимальні значення коефіцієнта корисної дії 56–57% встановлені за парового зволоження на швидкостях потоку вологого повітря 0,4–0,6 м/с з температурою 50–60 °С та відносною вологістю 55–60%.

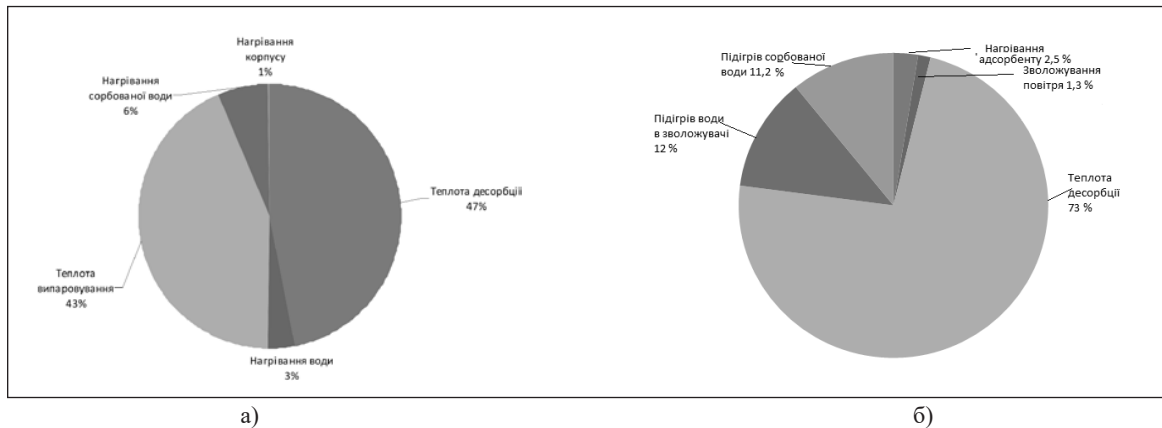


Рис. 4. Структура витрат на експлуатацію теплоакumuлюючого пристрою відкритого типу за парового зволоження (а) та ультразвукового зволоження (б)

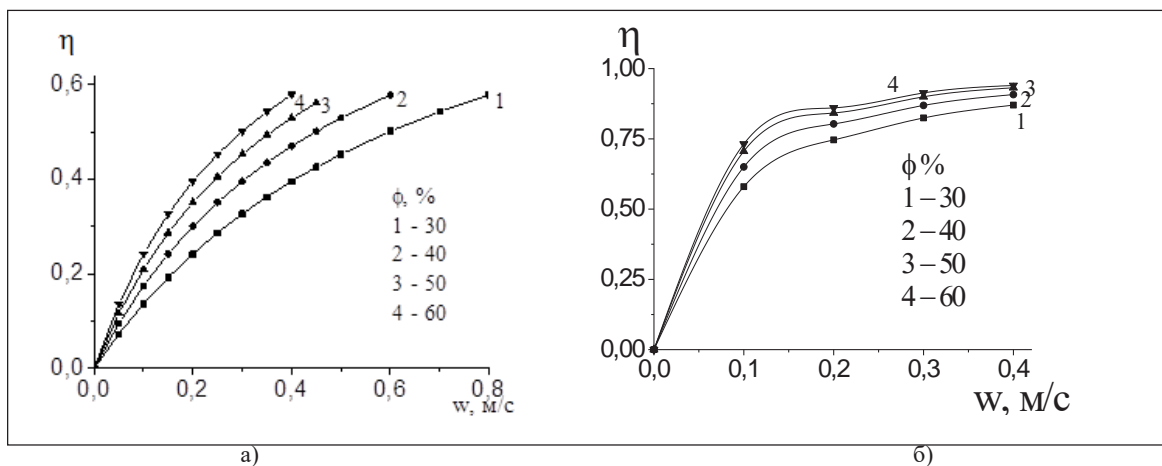


Рис. 5. Залежність коефіцієнта корисної дії від швидкості пароповітряного потоку за відносної вологості 30–60% і температур, °С: а – 40; б – 50; в – 60. Товщина шару адсорбенту – 0,5 м

Для розроблення заходів із підвищення коефіцієнта корисної дії проаналізовано структуру витрат під час експлуатації теплоакumuлюючого пристрою відкритого типу (рис. 4). Згідно з результатами аналізу, найбільш значні в разі парового зволоження витрати на випаровування води та десорбцію (рис. 4а). Скорочення маси води, яка подається до шару адсорбенту, не сприяє істотному підвищенню коефіцієнта корисної дії.

Але використання альтернативних засобів зволоження дозволяє істотно скоротити витрати на зволоження повітря (рис. 4б). Так, ультразвукове зволоження потоку повітря дозволяє не лише підвищити коефіцієнт корисної дії теплоакumuлюючого пристрою до не менш як 60%, але й розширити інтервал швидкостей, відповідних його максимальним значенням, до 0,2–0,4 м/с (рис. 5).

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Відповідно до результатів математичного моделювання встановлено, що величина ККД адсорбційного акумулятора теплової енергії залежить від швидкості потоку вологого повітря, а також його тем-

ператури та відносної вологості, тобто концентрації вологи на вході в шар адсорбенту.

Зростання швидкості приводить до збільшення ККД, що є результатом підвищення об'єму поданого повітря, отже, кількості вологи, яка поступає до шару адсорбенту, та величини адсорбції. Максимальні значення коефіцієнтів корисної дії спостерігаються за швидкостей потоку вологого повітря приблизно 0,4–0,6 м/с і абсолютної вологості 55–60%.

Використання ультразвукового зволоження повітря дозволяє істотно скоротити витрати на зволоження потоку повітря і підвищити ККД адсорбційного теплоакumuлюючого пристрою не менш ніж на 10% порівняно з паровим зволоженням.

ВИСНОВКИ

Досліджено процеси експлуатації адсорбційного акумулятора теплової енергії на основі композитного адсорбенту «силікагель – сульфат». Запропоновано алгоритм розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного теплового акумулятора.

Показано кореляцію складу адсорбенту та конструктивних характеристик теплоакumuлюючого при-

строю. Мінімальний об'єм адсорбенту для покриття навантаження на підігрів припливного повітря встановлено для композита, який містить 20% силікагелю та 8% натрій сульфату.

Проведено моделювання процесів експлуатації адсорбційного регенератора на основі композита «силікагель – натрій ацетат» в умовах типової системи вентиляції. Встановлено, що за парового зволоження потоку повітря максимальні значення коефіцієнта корисної дії, які відповідають граничній адсорбції, спостерігаються за температур пароповітряного потоку 40–60 °С, відносної вологості повітря 55–60% та швидкості потоку вологого повітря 0,4–0,6 м/с.

Проаналізовано основні заходи з підвищення ефективності адсорбційного теплоакumuлюючого пристрою відкритого типу. Показана перспективність ультразвукового зволоження потоку повітря. Визначені оптимальні умови експлуатації адсорбційного теплового акумулятора за ультразвукового зволоження повітря, які дозволяють експлуатувати теплоакumuлюючий пристрій із максимальними значеннями коефіцієнта корисної дії: швидкість потоку вологого повітря – 0,2–0,4 м/с, відносна вологість – 40–60%

Представлена робота виконана за часткової підтримки Міністерства освіти і науки України в межах держбюджетної НДР 0119U002243.

REFERENCES

- [1] De Jong A.-J., Trausel F., Finck C., van Vliet L., Cuypers R. (2014). Thermochemical Heat Storage – System Design Issues. *Energy Procedia*, 48, 309–319.
- [2] Al-Alili A., Hwang Yu., Radermacher R. (2014). Review of solar thermal air conditioning technologies. *Int. J. Refrigeration*, 39, 4–22.
- [3] Scapino L., Zondag H.A., Van Bael J., Diriken J., Rindt C.C.M. (2017). Sorption heat storage for long-term low-temperature applications [A review on the advancements at material and prototype scale]. *Applied Energy*, 190, 920–948.
- [4] Manyumbua E., Martin V., Fransson T. (2014). Simple mathematical modeling and simulation to estimate solar-regeneration of a silica gel bed in a naturally ventilated vertical channel for Harare, Zimbabwe. *Energy Procedia*, 57, 1733–1742.
- [5] Freni A., Maggio G., Sapienza A., Frazzica A., Restuccia G., Vasta S. (2016). Comparative analysis of promising adsorbent/adsorbate pairs for adsorptive heat pumping, air conditioning and refrigeration. *Applied Thermal Engineering*, 104, 85–95.
- [6] Zondag H., Kikkert B., Smeding S., Boer R. de, Bakker M. (2013). Prototype thermochemical heat storage with open reactor system. *Applied Energy*, 109, 360–365.
- [7] Aristov Yu I. (2015) Current progress in adsorption technologies for low-energy buildings. *Future Cities and Environment*, 10, 1–13.
- [8] Cabeza L. F., Solé A., Barreneche C. (2017). Review on sorption materials and technologies for heat pumps and thermal energy storage. *Renewable Energy*, 110, 3–39.
- [9] Grekova A. D., Gordeeva L. G., Aristov Y. I. (2017). Composite “LiCl/vermiculite” as advanced water sorbent for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 124, 1401–1408.
- [10] Schreiber H., Lanzerath F., Bardow A. (2018). Predicting performance of adsorption thermal energy storage: from experiment to validated dynamic models. *Applied Thermal Engineering*, 141, 548–557.
- [11] Grekova A.D., Gordeeva L.G., Aristov Y.I. (2017). Composite “LiCl/vermiculite” as advanced water sorbent for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 124, 1401–1408.
- [12] Nagel T., Beckert S., Lehmann C., Glaser R., Kolditz O. (2016). Multi-physical continuum models of thermochemical heat storage and transformation in porous media and powder beds – A review. *Applied Energy*, 178, 323–345.
- [13] Gaecini, M., Zondag, H.A., Rindt, C.C.M. (2016). Effect of kinetics on the thermal performance of a sorption heat storage reactor, *Applied Thermal Engineering*, 102, 520–531.
- [14] Hanzha Y.H., Khymentko A.H. (2012). Teplovoe akkumulyrovanye kak sposob povisheniya enerhetycheskoieffektivnostysystem teplosnabzheniya Enerhosberezhenye, *Enerhetyka, Enerhoaudyt*, 3(97), 16–21.
- [15] Sukhyy K. M., Belyanovskaya E. A., Kolomiyets, E. V. (2018). Design and performance of adsorptive transformers of heat energy. Riga, Latvia: LAP Lambert Academic Publishing, 117 p.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Thermochemical Heat Storage – System Design Issues / A.-J. De Jong et al. *Energy Procedia*. 2014. № 48. P. 309–319.
- [2] Al-Alili A., Hwang Yu., Radermacher R. Review of solar thermal air conditioning technologies. *Int. J. Refrigeration*. 2014. № 39. P. 4–22.
- [3] Sorption heat storage for long-term low-temperature applications [A review on the advancements at material and prototype scale] / L. Scapino et al. *Applied Energy*. 2017. № 190. P. 920–948.
- [4] Manyumbua E., Martin V., Fransson T. Simple mathematical modeling and simulation to estimate solar-regeneration of a silica gel bed in a naturally ventilated vertical channel for Harare, Zimbabwe. *Energy Procedia*. 2014. № 57. P. 1733–1742.
- [5] Comparative analysis of promising adsorbent/adsorbate pairs for adsorptive heat pumping, air conditioning and refrigeration / A. Freni et al. *Applied Thermal Engineering*. 2016. № 104. P. 85–95.
- [6] Prototype thermochemical heat storage with open reactor system / H. Zondag et al. *Applied Energy*. 2013. № 109. P. 360–365.

- [7] Aristov Yu. Current progress in adsorption technologies for low-energy buildings. *Future Cities and Environment*. 2015. № 10. P. 1–13.
- [8] Cabeza L., Solé A., Barreneche C. Review on sorption materials and technologies for heat pumps and thermal energy storage. *Renewable Energy*. 2017. № 110. P. 3–39.
- [9] Grekova A., Gordeeva L., Aristov Y. Composite “LiCl/vermiculite” as advanced water sorbent for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*. 2017. № 124. P. 1401–1408.
- [10] Schreiber H., Lanzerath F., Bardow A. Predicting performance of adsorption thermal energy storage: from experiments to validated dynamic models. *Applied Thermal Engineering*. 2018. № 141. P. 548–557.
- [11] Multi-physical continuum models of thermo chemical heat storage and transformation in porous media and powder beds : A review / T. Nagel et al. *Applied Energy*. 2016. №178. P. 323–345.
- [12] Gaeini M., Zondag H., Rindt C.C.M. Effect of kinetics on the thermal performance of a sorption heat storage reactor. *Applied Thermal Engineering*. 2016. № 102. P. 520–531.
- [13] Ганжа И., Хименко А. Тепловое аккумулирование как способ повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2012. № 3 (97). С. 16–21.
- [14] Sukhyu K., Belyanovskaya E., Kolomiyets E. Design and performance of adsorptive transformers of heat energy. Riga, Latvia : LAP Lambert Academic Publishing, 2018. 117 p.