

УДК 662.995

*Беляновська О.А., Литовченко Р.Д., Михайлов А.Г., Сухий К.М., Суха І.В.***АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АДСОРБЦІЙНОГО АКУМУЛЯТОРА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ВІДКРИТОГО ТИПУ НА ОСНОВІ КОМПОЗИТНИХ АДСОРБЕНТІВ****ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна**

Робота присвячена розробці ефективного алгоритму визначення експлуатаційних і конструктивних характеристик адсорбційного акумулятора теплової енергії відкритого типу. Отримав подальший розвиток алгоритм розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного теплового акумулятора відкритого типу. Пропонується наступний порядок розрахунку: обчислення коефіцієнта масопередачі, визначення маси води, яку подано з пароповітряним потоком до шару теплоакumuлюючого матеріалу (адсорбенту), розрахунок величини адсорбції, корисної теплоти адсорбції, визначення витрат теплоти на процес, які включають витрати теплоти для нагріву адсорбенту, корпусу установки, води в зволожувачі, випаровування води, нагрівання адсорбованої води і десорбцію, а також обчислення коефіцієнта корисної дії. Маса води, яку подано до шару адсорбента визначали двома способами: відповідно до граничної адсорбції або враховуючи об'єм та абсолютну вологість пароповітряного потоку, який поступає до шару адсорбенту. Вивчено експлуатаційні характеристики теплового акумулятора відкритого типу при використанні композитного адсорбенту «силікагель–натрій сульфат». Підтверджено підвищення коефіцієнта корисної дії при зростанні швидкості та відносної вологості пароповітряного потоку. Показано кореляцію конструктивних характеристик та ефективності адсорбційного теплоакumuлюючого пристрою. Базуючись на запропонованому алгоритмі, показано, що максимальні значення коефіцієнта корисної дії відповідають площі перерізу теплоакumuлюючого матеріалу 0,08–0,11 м² за умови відносної вологості пароповітряного потоку не нижче 40–50% та швидкостях 0,5–0,8 м/с. Результати здійсненого дослідження можуть бути використані при розробці енергоефективних децентралізованих систем повітряного опалення, а також адсорбційних модулів-осушувачів для житлових приміщень.

Ключові слова: адсорбційний акумулятор теплової енергії, коефіцієнт корисної дії, теплота адсорбції, композитний адсорбент.

DOI: 10.32434/2521-6406-2019-5-1-3-8

Постановка проблеми

Теплоакumuлюючі пристрої використовують в різних галузях промисловості: для захисту електронних приладів від перегріву, для стабілізації температур в приміщенні та обладнання. Ключевим є використання акумуляторів теплової енергії в геліосистемах теплопостачання, яке дозволяє скорегувати добову та сезонну нерівномірність потоку сонячного випромінювання, а також незбалансованість періодів виробництва та споживання теплової енергії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Застосування адсорбційних теплових акумуляторів в системах опалювання, а також підігріву та кондиціонування припливного повітря пропонувалось протягом останніх десяти років [1–3]. Перспективними для подібних пристроїв для поглинання, трансформації та акумуляування теплової енергії є композитні адсорбенти типу «сіль в поринній матриці» [4,5]. Так, композит SWS-1A (оксид алюмінію, який імпрегровано кальцій хлоридом) виявив кращі адсорбційні властивості в порівнянні з традицій-

ними діоксидом кремнію та оксидом алюмінію [5]. В той же час, математичні моделі розглядають переважно одну зі стадій процесів експлуатації адсорбційних теплоакумулюючих пристроїв, зокрема, процеси масоперенесення при адсорбції [6,7]. Алгоритми та методики розрахунку, які дозволяють оцінити кореляцію конструкції та ефективність експлуатації акумуляторів теплової енергії розроблені переважно для ємнісних пристроїв [8]. Отже стає актуальною задача розробки загальних принципів визначення конструктивних характеристик, які відповідають максимальній ефективності адсорбційних теплоакумулюючих пристроїв.

Формування мети дослідження

Надана робота присвячена розробці алгоритму визначення конструктивних характеристик адсорбційного теплового акумулятора, які відповідають його максимальній ефективності.

Конструкція теплоакумулюючого пристрою відкритого типу наведена на рис. 1 згідно з [2].

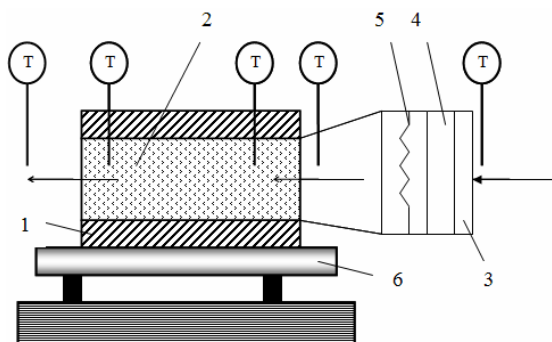


Рис. 1. Експериментальна установка для дослідження теплоакумулюючих матеріалів: 1 – теплоізолюючий корпус; 2 – теплоакумулюючий матеріал; 3 – компресор; 4 – зволожувач; 5 – резистивний нагрівальний елемент; 6 – терези

Експлуатацію здійснюють в два етапи. На першому етапі повітря з навколишнього середовища за допомогою компресора 3 подають в зволожувач 4, де його відносна вологість зростає до 60–80 %. Далі зволене повітря нагрівають в електричному резистивному нагрівальному елементі 5, до температур більш за 30°. Потім зволене повітря подають до шару адсорбенту. Після нетривалого прогрівання теплоакумулюючого матеріалу (15 хв) вода адсорбується з повітря, що подається в теплоакумулюючий матеріал, що є екзотермічним процесом. Температури як теплоакумулюючого матеріалу, так і повітря зростають. При цьому температура повітря на виході з теплоакумулюючого пристрою скла-

дає 90–115°C. На другому етапі здійснюється регенерація адсорбента шляхом подачі гарячого повітря, що приводить до нагрівання адсорбенту до температур не нижче 90°C, і, отже, до десорбції.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) розраховували за запропонованим алгоритмом [2], як, %:

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

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:

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

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, корпуса установки, нагрівання води в баку, випаровування води в баку, десорбцію, нагрівання адсорбованої води, кДж.

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

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta t, \quad (4)$$

де M – маса матеріалу або деталі, кг; C – теплоємність матеріалу або деталі, кДж/кг·К; Δt – зміна температури, °С.

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

$$Q_{\text{вип}}^{\text{води}} = M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta H_{\text{вип}}. \quad (5)$$

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

$$Q_{\text{дес}} = \Delta H_{\text{дес}} \cdot M_{\text{адс}} \cdot A \quad (6)$$

і на нагрівання адсорбованої води:

$$Q_{\text{сор}}^{\text{води}} = M_{\text{адс}} \cdot A \cdot C_{\text{в}} \cdot (t_{\text{рег}} - t_{\text{н.с}}), \quad (7)$$

де $t_{\text{рег}}$ – температура регенерації адсорбенту, °C; $t_{\text{н.с.}}$ – температура навколишнього середовища, °C; $\Delta H_{\text{дес}}=2850$ – теплота десорбції, кДж/кг.

Величину адсорбції визначали, як:

$$A = \frac{C_0 - C}{M_{\text{адс}}} \cdot V_{\text{пов}}, \quad (8)$$

де $V_{\text{пов}}$ – об'єм повітря: $V_{\text{пов}}=F_{\text{адс}} \cdot w \cdot t$, 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 [2]:

$$C = \frac{C_0}{\frac{[\beta \cdot (-\tau \cdot w \cdot C_0) + H]}{e^{\frac{A_{\text{max}}}{w}} + 1}}, \quad (9)$$

де t – тривалість адсорбції, с; C_0 – абсолютна вологість пароповітряного потоку на вході в тепловий акумулятор, кг/м³; H – шару адсорбента, м; A_{max} – адсорбційна ємність теплоакуючого матеріалу, кг/кг; β – коефіцієнт масопередачі, с⁻¹, який визначено згідно з залежністю [2]:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{1}{\beta_n} + \frac{1}{\beta_{\text{пр}}},$$

де β_y , β_n та $\beta_{\text{пр}}$ – коефіцієнти масовіддачі в газовій фазі, в порах і повздовжнього перемішування [2].

Для розробки методів підвищення коефіцієнта корисної дії виконано аналіз структури теплових витрат при експлуатації теплоакуючого пристрою відкритого типу [2]. Згідно з його результатами встановлено, що найбільш значними є витрати на випаровування води (43%) та десорбцію (47%), далі йдуть витрати на нагрів адсорбованої води (6%), нагрівання води (3%) та нагрівання корпусу теплового акумулятора (1%). Вочевидь, істотно скоротити витрати теплоти можна шляхом зміни маси води, яку подано до шару адсорбенту.

Масу води, яка подана до шару адсорбенту, може бути прийнято відповідно до граничної адсорбції

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = A_{\text{max}} \cdot M_{\text{адс}} \quad (10)$$

або, враховуючи швидкість потоку вологого повітря, як добуток об'єму повітря, що пройшов через теплокумулюючий матеріал, $V_{\text{пов}}$ та абсолютної вологості пароповітряного потоку на вході до шару адсорбента C_0 :

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{пов}} \cdot C_0. \quad (11)$$

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

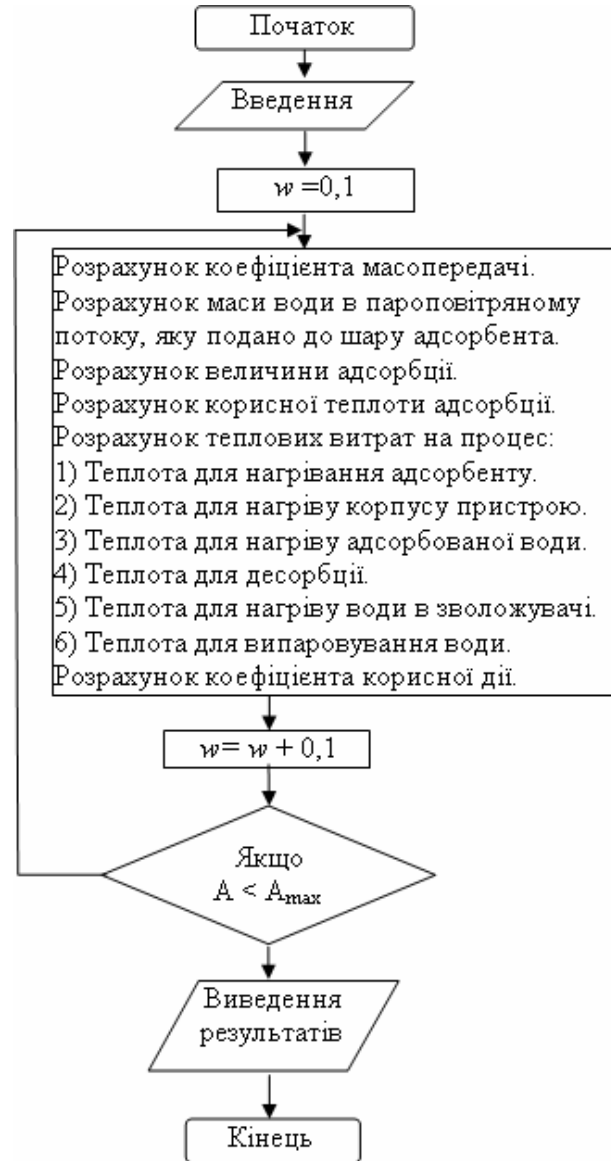


Рис. 2. Блок-схема алгоритму розрахунку коефіцієнта корисної дії адсорбційного теплового акумулятора відкритого типу

Викладення основного матеріалу дослідження

Рис. 3 показує залежність коефіцієнта корисної дії від швидкості пароповітряного потоку, що подається на теплоакумулюючий пристрій. Лінія 1 показує, що, якщо маса води прийнята відповідною граничній адсорбції, то максимальне значення коефіцієнта корисної дії (ККД) спостерігається в доволі вузькому діапазоні швидкостей.

В той же час, якщо при подачі води відповідно до об'єму та абсолютній вологості повітря згідно з формулою (11), то на графіку залежності ККД від швидкості повітря, він виходить на плато при $w=0,1$ м/с (рис. 3, криві 2). В той же час при аналогічних умовах (рис. 4), оскільки маса води, яка подано до шару теплоакумулюючого матеріалу, не лише залежить від швидкості потоку, але й перевищує величину, що відповідає адсорбції водяної пари шаром композиту за даних умов, близько в три рази. Коефіцієнт корисної дії при цьому не перевищує 40%.

Скорегувати величину маси води, яку подано до шару адсорбента, враховуючи вплив абсолютної вологості повітря на адсорбцію, можливо, вочевидь, змінюючи об'єм повітря, шляхом зміни площі перерізу теплового акумулятора, і, отже, товщини шару адсорбенту. Так, зниження площі перерізу від 0,1662 до 0,0831 м² сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії від 42 до 50% (рис. 5). При цьому максимальні значення коефіцієнта корисної дії спостерігаються в більш широкому інтервалі швидкостей пароповітряного потоку в порівнянні з подачею вологи відповідно до граничної адсорбції.

В той же час максимальні значення адсорбції спостерігаються вочевидь при значеннях $w=0,5-0,8$ м/с [2] температурах 40–60°C та відносних вологостях пароповітряного потоку не нижче за 40–50%. Отже, враховуючи забезпечення максимального теплового навантаження, доцільно експлуатувати тепловий акумулятор відповідно до зазначених експлуатаційних характеристик.

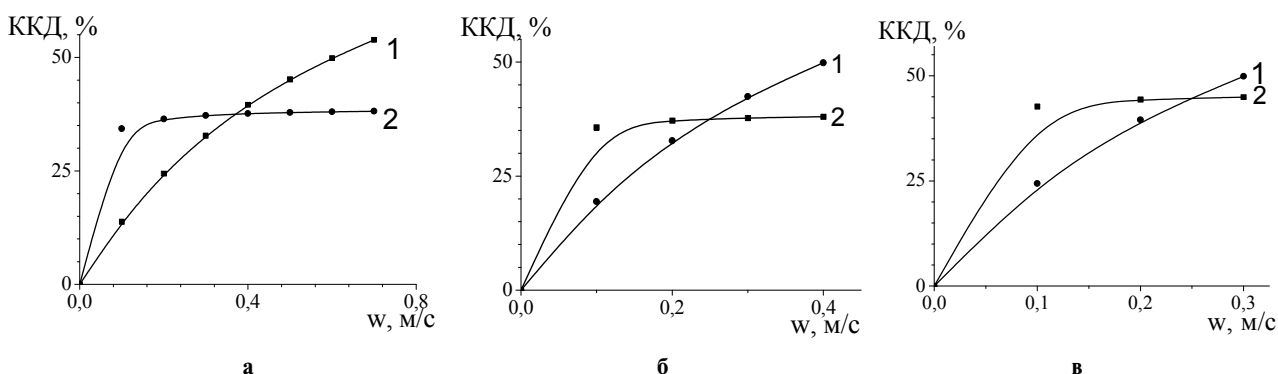


Рис. 3. Вплив швидкості пароповітряного потоку (абсолютна вологість: а – 0,04; б – 0,06; в – 0,08 г/м³) на коефіцієнт корисної дії адсорбційного теплового акумулятора відкритого типу: 1 – маса води відповідає граничній адсорбції; 2 – маса води, яка подана з вологим повітрям до шару адсорбенту

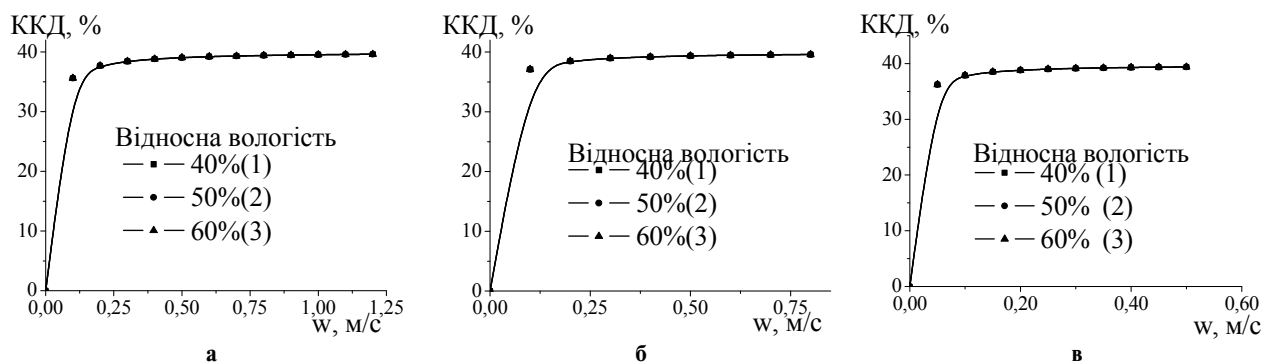


Рис. 4. Вплив швидкості пароповітряного потоку та відносної вологості на коефіцієнт корисної дії адсорбційного теплового акумулятора відкритого типу. Температура пароповітряного потоку, °C: а – 40; б – 50; в – 60. Товщина шару адсорбенту 0,25 м

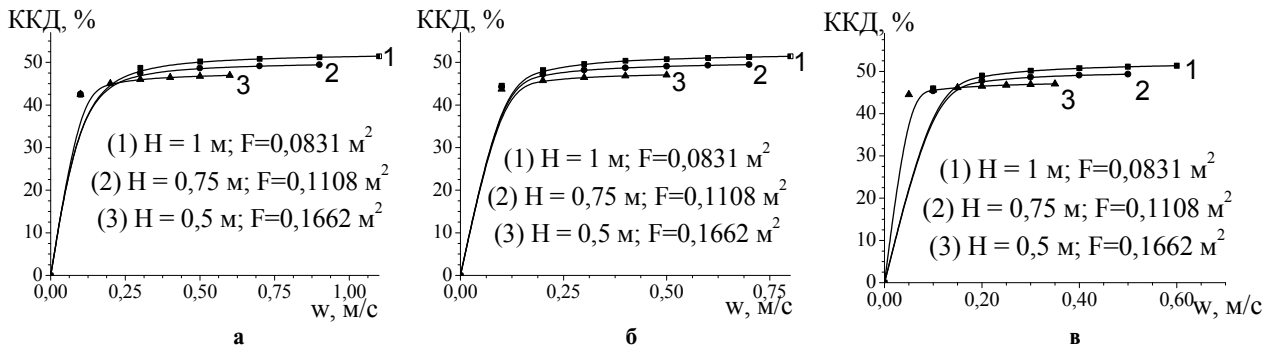


Рис. 5. Вплив конструктивних характеристик на величину коефіцієнта корисної дії теплоакumuлюючого пристрою відкритого типу. Температура пароповітряного потоку 50°C . Відносна вологість пароповітряного потоку: а – 30%; б – 40%; в – 50%

Висновки

Досліджено процеси експлуатації адсорбційного акумулятора теплової енергії відкритого типу на основі композитного адсорбента «сілікагель – натрій сульфат». Отримав подальший розвиток алгоритм визначення експлуатаційних характеристик адсорбційного теплового акумулятора.

Показано вплив швидкості, температури та вологості пароповітряного потоку на коефіцієнт корисної дії теплового акумулятора. Встановлено кореляцію між конструктивними характеристиками коефіцієнтом корисної дії адсорбційного теплоакumuлюючого пристрою. Максимальні значення коефіцієнта корисної дії відповідають площі перерізу теплоакumuлюючого матеріалу $0,08\text{--}0,11\text{ м}^2$ за умови відносної вологості пароповітряного потоку не нижче 40–50% та швидкостях $0,5\text{--}0,8\text{ м/с}$.

Надана робота виконана за часткової підтримки Міністерства освіти і науки України (номер держреєстрації теми НДР 0119U002243).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gordeeva L.G., Aristov Yu.I. Adsorptive heat storage and amplification: new cycles and adsorbents // Energy. – 2019. – Vol.167. – P.440-453.
2. Sukhyu K.M., Belyanovskaya E.A., Kolomiyets E.V. Design and performance of adsorptive transformers of heat energy. – Riga, Latvia: LAP Lambert Academic Publishing, 2018. – 117 p.
3. Scapino L., Zondag H.A., Van Bael J., Diriken J., Rindt C.C.M. Sorption heat storage for long-term low-temperature applications: A review on the advancements at material and prototype scale // Applied Energy. – 2017. – Vol.190. – P.920-948.
4. Grekova A.D., Gordeeva L.G., Aristov Y.I. Composite “LiCl/vermiculite” as advanced water sorbent for thermal energy storage // Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol.124. – P.1401-1408.

5. Aristov Yu I. Current progress in adsorption technologies for low-energy buildings // Future Cities and Environment. – 2015. – Vol.1. – № 10. – P.1-13.

6. Nagel T., Beckert S., Lehmann Ch., Glöser R., Kolditz O. Multi-physical continuum models of thermochemical heat storage and transformation in porous media and powder beds – A review // Applied Energy. – 2016. – Vol.178. – P.323-345.

7. Schreiber H., Lanzerath F., Bardow A. Predicting performance of adsorption thermal energy storage: from experiments to validated dynamic models // Applied Thermal Engineering. – 2018. – Vol.141. – P.548-557.

8. Ганжа И.Г., Хищенко А.Г. Тепловое аккумулярование как способ повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения // Энергосбережение. – Энергетика. – Энергоаудит. – 2012. – № 3 (97). – С.16-21.

Надійшла до редакції 31.03.2019

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АДСОРБЦИОННОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ОТКРЫТОГО ТИПА НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ АДСОРБЕНТОВ

Беляновская Е.А., Литовченко Р.Д., Михайлов А.Г., Сухой К.М., Сухая И.В.

Работа посвящена разработке эффективного алгоритма определения эксплуатационных и конструктивных характеристик адсорбционного аккумулятора тепловой энергии открытого типа. Получил дальнейшее развитие алгоритм расчета эксплуатационных характеристик адсорбционного теплового аккумулятора открытого типа. Предлагается следующий порядок расчета: вычисление коэффициента массопередачи, определение массы воды, представленной с паровоздушным потоком к слою теплоаккумулярующего материала (адсорбента), расчет величины адсорбции, полезной теплоты адсорбции, определения расхода теплоты на эксплуатацию, включающие расходы теплоты для нагрева адсорбента, корпуса установки, воды в увлажнителе, испарения воды, нагрев адсорбированной воды и десорбцию, а также вычисления коэффициента полезного действия. Массу воды, поданной в слой адсорбента, определяли двумя способами: в соответствии с предельной адсорбции или учитывая объем и абсолютную влажность паровоздушного потока, который поступает в слой адсорбента. Изучены эксплуатационные характеристики теплового аккумулятора открытого типа при использовании ком-

позитного адсорбента «силикагель–натрий сульфат». Подтверждено повышение коэффициента полезного действия при росте скорости и относительной влажности паровоздушной потока. Показана корреляция конструктивных характеристик и эффективности адсорбционного теплоаккумулирующего устройства. Основываясь на предложенном алгоритме, показано, что максимальные значения коэффициента полезного действия соответствуют площади сечения теплоаккумулирующего материала $0,08-0,11 \text{ м}^2$ при относительной влажности паровоздушной потока не ниже 40–50% и скоростях $0,5-0,8 \text{ м/с}$. Результаты проведенного исследования могут быть использованы при разработке энергоэффективных децентрализованных систем воздушного отопления, а также адсорбционных модулей-осушителей для жилых помещений.

Ключевые слова: адсорбционный аккумулятор тепловой энергии, коэффициент полезного действия, теплота адсорбции, композитный адсорбент.

ALGORITHM FOR CALCULATION OF DESIGN AND PERFORMANCE OF OPEN-TYPE HEAT STORAGE DEVICE BASED ON COMPOSITE ADSORBENTS

Belyanovskaya E.A., Lytovchenko R.D., Mikhailov A.G., Sukhyy K.M., Sukha I.V.

Ukrainian State University of Chemical Engineering, Dnipro, Ukraine

The present work is focused on the development of an effective algorithm to determine the operational and design characteristics of an open-type thermal energy storage device. The algorithm for calculating the performance characteristics of an open type adsorption heat accumulator has been further developed. The following calculation procedure is proposed: calculating the mass transfer coefficient, determining mass of water supplied with vapor-air flow to the heat storage material layer (adsorbent), calculation of adsorption, effective heat of adsorption, determination of an operational heat input, including a heat input for warming of an adsorbent, a case, water in a humidifier, evaporation of water, heating the adsorbed water and desorption, as well as calculating the efficiency factor. The mass of water supplied to the adsorbent layer was determined in two ways: in accordance with the limiting adsorption or taking into account the volume and absolute humidity of the vapor-air flow that enters the adsorbent layer. The performance of an open-type thermal accumulator was studied using the composite adsorbent "silica gel-sodium sulphate". An increase in the efficiency with increasing speed and relative humidity of a vapor-air flow was confirmed. The correlation between design characteristics and an efficiency factor of an adsorptive heat storage device is shown. Based on the proposed algorithm, it is shown that the maximum values of efficiency correspond to the cross-sectional area of heat-accumulating material $0,08-0,11 \text{ м}^2$ at a relative humidity of the vapor-air flow of not less than 40–50% and speeds of $0,5-0,8 \text{ м/с}$. The results of the study can be used in the development of energy-efficient decentralized air heating systems, as well as adsorption dryers for residential premises.

Keywords: adsorption accumulator of thermal energy, efficiency, heat of adsorption, composite adsorbent.

REFERENCES

1. Gordeeva L.G., Aristov Yu.I. *Adsorptive heat storage and amplification: new cycles and adsorbents*. Energy, 2019, vol. 167, pp.440-453.
2. Sukhyy K.M., Belyanovskaya E.A., Kolomiyets E.V. *Design and performance of adsorptive transformers of heat energy*. Riga, Latvia: LAP Lambert Academic Publishing, 2018, 117 p.
3. Scapino L., Zondag H. A., Van Bael J., Diriken J., Rindt C.C.M. *Sorption heat storage for long-term low-temperature applications: A review on the advancements at material and prototype scale*. Applied Energy, 2017, vol. 190, pp.920-948.
4. Grekova A.D., Gordeeva L.G., Aristov Y.I. *Composite "LiCl/vermiculite" as advanced water sorbent for thermal energy storage*. Applied Thermal Engineering, 2017, vol. 124, pp.1401-1408.
5. Aristov Yu I. *Current progress in adsorption technologies for low-energy buildings*. Future Cities and Environment, 2015, vol. 1, no 10, pp.1-13.
6. Nagel T., Beckert S., Lehmann Ch., Gläser R., Kolditz O. *Multi-physical continuum models of thermochemical heat storage and transformation in porous media and powder beds—A review*. Applied Energy, 2016, vol. 178, pp.323-345.
7. Schreiber H., Lanzerath F., Bardow A. *Predicting performance of adsorption thermal energy storage: from experiments to validated dynamic models // Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 141, pp.548-557.
8. Ganga I.G., Khiminko A.G. *Teplovoe akumulirovanie kak sposob povysheniya energeticheskoy effektivnosti sistem teplosnabgeniya* [Heat storage as a method of enhancing of energy efficiency of heat supply system]. Energoberegenie, Energetika, Energoaudit, 2012, no 03(97), pp.16-21 (in Russian).