УДК 662.995 : 662.997

Експлуатація адсорбційних холодильних установок на основі композитів «силікагель – натрій сульфат» для зберігання сільськогосподарської продукції

О. А. Бєляновська [1]✉, ***Г. М. Пустовой*** [1], ***К. М. Сухий*** [1], ***М. В. Губинський*** [2], ***М. П. Сухий***, ***О. В. Дорошенко*** [3], ***Я. О. Сергієнко*** [1]

[1] ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна 8, м. Дніпро, 49005, Україна

[2] Національна Металургійна Академія України, пр. Гагаріна 4, м. Дніпро, 49005, Україна

[3] Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна 112, м. Одеса, 65039, Україна

✉ e-mail: belyanovskaya@voliacable.com

Ключевими проблемами впровадження адсорбційних холодильних геліоустановок наряду зі властивостями використовуваних адсорбентів є сезонна та добова нерівномірність сонячного випромінювання, а також утилізація теплоти адсорбції. Мета представленої роботи – визначення експлуатаційних характеристик адсорбційних холодильних геліоустановок на основі композитних адсорбентів «силікагель – натрій сульфат». Основними конструктивними елементами адсорбційної холодильної установки є адсорбер, на лицевій стороні якого встановлено прозору ізоляцію, виконану зі стільникового полікарбонатного пластику САН (товщиною 8 мм) з інтегральним коефіцієнтом пропускання на рівні 0,88, а в нижній частині розміщено композитний адсорбент «силікагель – натрій сульфат», конденсатор, випарник, який встановлено біля холодильної камери. В шарі адсорбенту встановлено гідравлічний контур, по якому циркулює вода. Нагріта вода може бути використана для підігріву адсорбента в ранковий період доби. Експлуатація адсорбційної геліоустановки відбувається в два етапи. На першому етапі відбувається відведення теплоти від холодильної камери за рахунок випаровування води в випарнику. Пари води дифундують до адсорбера, де поглинаються композитним адсорбентом. Другий етап відповідає регенерації адсорбенту (десорбція). яка здійснюється шляхом його нагрівання за рахунок сонячної енергії до температури регенерації. Досліджено експлуатаційні характеристики сонячного адсорбційного холодильника на основі композитів «силікагель – натрій сульфат». Розроблена методика визначення експлуатаційних характеристик, яка передбачає, розрахунок кількості теплоти, яку слід відводити від холодильної камери, визначення маси води в випарнику, витрат теплоти на регенерацію адсорбента, а також площі сонячного колектора та сонячного експлуатаційного холодильного коефіцієнта. Запропоновано технологічну схему для утилізації теплоти адсорбції. Показана можливість підігріву води за рахунок теплоти адсорбції від 50 до 90°С, при цьому маса води дорівнює від 277 до 681 кг. Показано, що отриманий теплоносій можливо використовувати для підігріву адсорбента «силікагель – натрій сульфат» в ранковий період часу.

Ключеві слова*: композитні адсорбенти, сонячні адсорбційні холодильні пристрої, адсорбція, утилізація, енергоефективність.*

doi: https://doi.org/ 10.15673/ret.v55i3.1574

© The Author(s) 2019. This article is an open access publication
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. Вступ

Ініціативи світової спільноти вимагають обмеження використання традиційних холодильних агентів на основі фтор-хлорвмісних вуглеводнів, і, отже, більш широкого впровадження холодильних установок на основі більш екологічно безпечних речовин, які використовують альтернативні джерела енергії. Типовим прикладом подібних пристроїв є адсорбційні холодильні геліоустановки, які наряду з холодильною камерою включають адсорбер, сонячний

колектор та випарник [1, 2]. Процес відведення теплоти від охолоджуваного середовища відбувається в результаті випаровування холодильного агенту, який поглинає адсорбент. Процес регенерації адсорбента проводять шляхом підведення теплоти за допомогою сонячного колектора. В якості холодильних агентів пропонувалось використовувати воду, метанол, етанол, аміак та ін. [2 – 4]. Як адсорбенти досліджувались традиційні силікагелі, активоване вугілля та цеоліти [3, 5, 6, 7]. Одним з екологічно найбезпечніших холодильних агентів, вочевидь, є вода. В той же час регенерація більшості традиційних адсорбентів вітчизняних та закордонних марок, наприклад, цеолітів та силікагелів відбувається при доволі високих температурах не менш за 100°С [8, 9]. Альтернативою подібним матеріалам мали б бути цеолітоподібні матеріали силікоалюмінофосфати, температура регенерації яких знаходиться в межах 60 – 90°С [9]. В той же час, сорбційна ємність цих адсорбентів дорівнює близько 0,25 г/г [9], що вимагає для створення та підтримання низьких температур значних об'ємів адсорбента, і, отже, високих площ колекторів та/або значних та сталих потоків теплоносіїв для регенерації. Перспективними для використання є композити типу «сіль в поринній матриці», які, як відомо, відрізняються високою адсорбційною ємністю та помірною температурою регенерації [8, 7].

Іншою перепоною для розширення впровадження адсорбційних сонячних холодильників є добова та сезонна нерівномірність потоку сонячного випромінювання. Компенсувати це було б можливо, шляхом акумулювання теплової енергії, яка виділяється при адсорбції. Вочевидь, властивості адсорбентів є одним з ключевих факторів, які впливають на експлуатаційні характеристики адсорбційних холодильних установок.

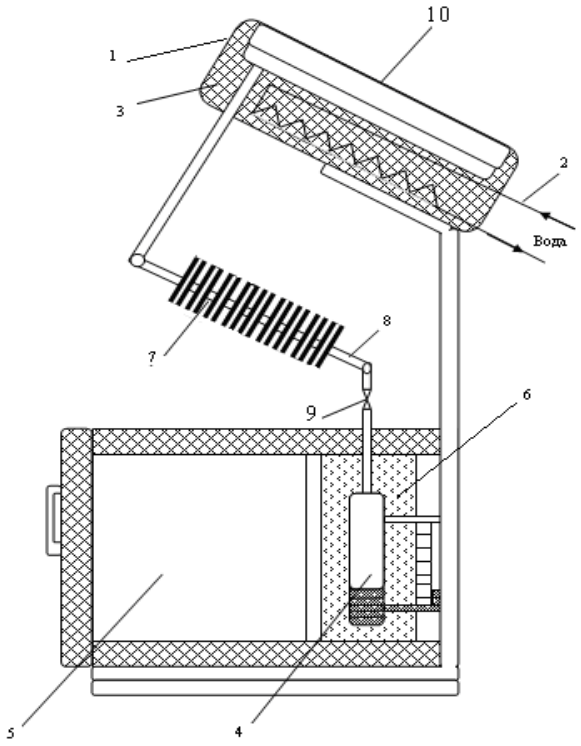
Мета представленої роботи – визначення експлуатаційних характеристик адсорбційних холодильних геліоустановок на основі композитних адсорбентів «силікагель – натрій сульфат».

2. Методика експерименту

Основні конструктивні елементи адсорбційного холодильника [10] (рис.1) включають адсорбер (1), конденсатор (5), випарник (4), який розміщено розміщений біля холодильної камери (6). На лицьовій стороні адсорбера встановлено прозору ізоляцію (10) виконану зі стільникового полікарбонатного пластику САН (товщиною 8 мм) з інтегральним коефіцієнтом пропускання на рівні 0,88, а в нижній частині розташовано композитний адсорбент «силікагель – натрій сульфат», який синтезовано згідно [10].

В результаті адсорбції води адсорбційним матеріалом (3), яка є екзотермічним процесом, температура в адсорбері (1) істотно підвищується. Для відбору цієї теплоти по гідравлічному контуру (2) пускають холодну воду. Нагріта вода може бути використана для регенерації адсорбційного матеріалу на другому етапі роботи холодильника, тобто регенерації адсорбента.

Експлуатація адсорбційного холодильника здійснюється в два етапи. Отримання холоду (перший етап) відбувається за рахунок випаровування води в випарнику (4), що сприяє зниженню температури в холодильній камері (6). Пари води при відкритому крані (9) дифундують через конденсатор до адсорбера.



1 – адсорбер; 2 – гідравлічний контур; 3 – адсорбент; 4 – випарник; 5 – холодильна камера; 6 – акумулятор холоду; 7 – конденсатор; 8 – трубопровід; 9 – кран; 10 – прозора ізоляція

Рисунок 1 – Адсорбційний холодильник [10]

Оскільки в стінках холодильника міститься великий об'єм води, холод в камері (6) підтримується на рівні 5 – 10 ^{0}С протягом 10 – 20 годин, до наступного циклу.

Нагрівають адсорбційний матеріал (3), використовуючи сонячну енергію, при закритому крані (9). Вода збирається в конденсаторі (5) далі зливається у випарник (4) і починається процес отримання холоду.

Експлуатаційний (сонячний) холодильний коефіцієнт є найбільш поширеним критерієм ефективності адсорбційної холодильної установки. Він повинен враховувати всю сонячну енергію, отриману поверхнею сонячного колектора (Q_s) згідно [8]. Таким чином, сонячний холодильний коефіцієнт визначається як:

$$COP_n = \frac{Q_1}{Q_s} \quad (1)$$

де COP_n – експлуатаційний холодильний коефіцієнт; Q_1 – кількість теплоти, яке необхідно відібрати з холодильної камери протягом доби, кДж; Q_s – теплова енергія, яка надходить до системи, за допомогою сонячного колектора, кДж.

Кількість теплоти, яке необхідно відвести з холодильної камери протягом доби, проводили відповідно [11] як суму тепла, що йде на охолодження самої камери та внесених продуктів та на покриття теплових притоків як до самої камери так і при відкриванні камери при внесенні продуктів:

$$Q_1 = C \cdot m \cdot \Delta T + C_П \cdot m_П \cdot \Delta T + \sum Q_z \text{, кДж} \quad (2)$$

де С – теплоємність елементів конструкції, кДж/кг·^{0}С; $C_П$ – теплоємність продуктів внесених в холодильну камеру, кДж/кг·^{0}С; ΔT – різниця температури навколишнього середовища та середньодобової температури в холодильній камері, ^{0}С; m, $m_п$ – маса холодильної камери та внесених продуктів відповідно, кг; ΣQ_z – сума теплопритоків до камери в результаті теплопередачі через її стінки, підлогу та стелю, від інфільтрації зовнішнього повітря при відкритті камери та навантажень від освітлення, які визначали згідно [12], кДж.

Відбір тепла з холодильної камери здійснюється за рахунок випаровування води у випарнику. Кількість тепла, яке відбирається в холодильній камері при випаровуванні води, дорівнює добутку теплоти випаровування води $\Delta H_{вип}$ та її маси $m_в$:

$$Q_2 = \Delta H_{вип} \cdot m_В \text{ , кДж} \quad (3)$$

Звідси можна розрахувати масу води ($m_В$, кг) для забезпечення відбору необхідної кількості теплоти у холодильній камері.

Для компенсації добової нерівномірності метеорологічних умов доцільно підвищити масу води на 50 %. Таким чином маса води складає 33,29 кг.

Витрати теплоти на регенерацію адсорбенту можна розрахувати за формулою:

$$Q_3 = m_к \cdot C_к \cdot \Delta T_1 + m_в \cdot C_в \cdot \Delta T_1 + m_В \cdot \Delta H_{дес}, \quad (4)$$

де ΔT_1 – різниця температури адсорбенту та температури регенерації, ^{0}С; $\Delta H_{дес.}$ – теплота десорбції води, кДж/кг; $m_к$, $m_В$ – відповідно маса адсорбенту і адсорбованої води, кг; $C_к$, $C_в$ – теплоємність адсорбенту та води відповідно, кДж/кг·^{0}С.

Сонячна енергія, що подається в систему (Q_s), дорівнює добутку поверхні сонячного колектора та потоку сонячної радіації на поверхню колектора протягом одного дня. Тоді, площу колектора, яка необхідна для підведення теплоти Q_3, та кількість теплоти підведеної за її допомогою згідно методики [12]

$$F_k = \frac{Z_k \cdot Q_3}{Q_k} \quad (5)$$

де F_k – площа колектора, м^2; Q_3 – кількість теплоти, яку необхідно затратити на регенерацію адсорбенту, МДж; Q_k – кількість теплоти підведеної до адсорбента від 1 м^2 сонячного колектора, МДж/м^2 прийнята як мінімальна в період експлуатації 15,87 МДж/м^2 згідно [10]; Z_k – коефіцієнт запасу який враховує нерівномірність сонячної радіації протягом доби або сезону [12].

3. Результати та обговорення

Результати розрахунку експлуатаційного холодильного коефіцієнта наведені в таблиці 1. Максимальних значень експлуатаційний холодильний коефіцієнт набуває в вересні, а мінімальних – протягом травня та липня.

Таблиця 1 – Експлуатаційний холодильний коефіцієнт на основі композитного сорбенту «силікагель – натрій сульфат»

Місяц	Середньодобове значення величини сонячного випромінювання, МДж/м^2	Кількість теплоти, що підведена до колектора, МДж	Експлуатаційний холодильний коефіцієнт
Травень	21,56	214,56	0,25
Червень	21,09	209,90	0,26
Липень	21,81	217,06	0,25
Серпень	20,37	202,74	0,27
Вересень	15,87	157,96	0,34

Згідно з даними наведеними у работ M.S. Fernandes et al. [8] експлуатаційний холодильний коефіцієнт установок на основі пари «силікагель – вода» не перевищує 0,2, «Цеоліт – вода» до 0,3. Таким чином, ефективність даної холодильної установки відповідає для систем з аналогічним хладогентом.

Оскільки адсорбція водяної пари є екзотермічним процесом, то вочевидь при експлуатації холодильної установки виділяється значна кількість теплоти. Далі проаналізовано можливості її утилилізації. Стандартною процедурою при цьому є використання теплоти адсорбції для підігріву теплоносія, який використовується для нагрівання адсорбента при регенерації.

Розроблена технологічна схема для утилізації теплоти адсорбції, яка представлена на рисунку 2.

Протягом стадії отримання холоду, який є результатом випаровування води в випарнику (1) та її адсорбції композитом в адсорбері (4), вода циркулює по гідравлічному контуру та нагрівається за рахунок теплоти адсорбції.

Масу та температуру води можна оцінити за допомогою теплового баланса.

Прихід теплоти, вочевидь відповідає адсорбції, яка виділяється при адсорбції:

$$Q_{адс} = M_{адс} \cdot \Delta H_{адс} \qquad (6)$$

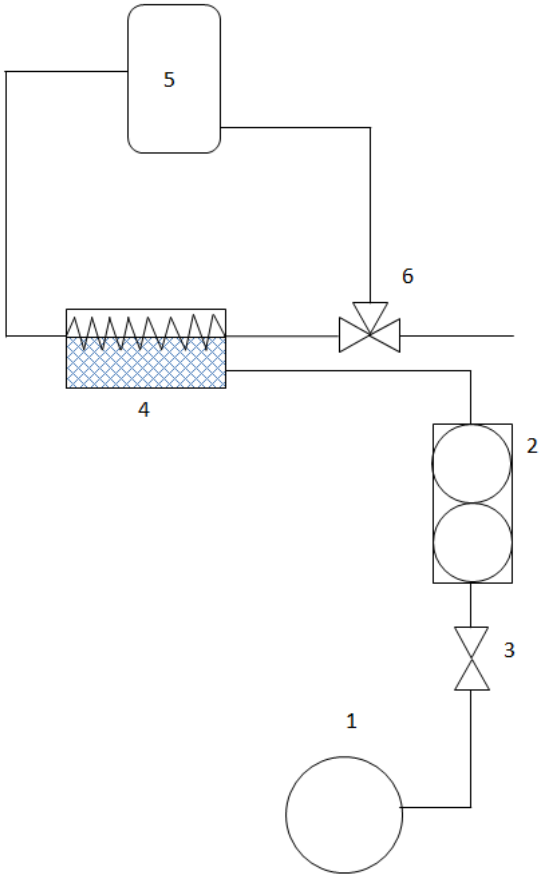
де $Q_{адс}$ – кількість теплоти, яка виділяється при адсорбції; Мадс – маса адсорбента; $\Delta H_{адс}$ – теплота адсорбції, кДж/кг.

Статті витрат включають:

1.Витрати на нагрів води H_2O в баку і гідравлічному контурі

$$Q_{H2O} = M_{H2O} \cdot C_{H2O} \cdot \Delta t \qquad (7)$$

де Q_{H2O} – витрати теплоти на нагрів води H_2O в баку і гідравлічному контурі, кДж; M_{H2O} – маса води, кг; C_{H2O} – теплоємність води, кДж/кг; Δt – підвищення температури води в баку та в контурі, °С.



1 – випарник; 2 – конденсатор; 3 – регулюючий кран; 4 – адсорбер; 5 – бак-акумулятор; 6 – трьохходовий вентиль

***Рисунок 2** – Технологічна схема для утилізації теплоти адсорбції*

2. Витрати на нагрів гідравлічного контуру

$$Q_{нагріву\ контуру} = M_{гідр.\ конт} \cdot C_{гідр.\ конт} \cdot \Delta t \qquad (8)$$

де $Q_{нагріву\ контуру}$ – витрати теплоти на нагрів гідравлічного контуру, кДж; $M_{гідр.\ конт}$ – маса гідравлічного контуру, кг; $C_{гідр.\ конт}$ – теплоємність гідравлічного контуру, кДж/кг; Δt – підвищення температури контуру, °С.

3. Витрати на нагрів адсорбенту

$$Q_{нагрів\ адсорбенту} = M_{адс.} \cdot C_{адс} \cdot \Delta t \qquad (9)$$

де $Q_{нагрів\ адсорбенту}$ – витрати теплоти на нагрів адсорбенту, кДж; $M_{адс.}$ – маса адсорбенту, кг; $C_{адс}$ – теплоємність адсорбенту, кДж/кг; Δt – підвищення температури адсорбенту, °С.

4. Витрати на нагрів адсорбованої води H_2O

$$Q_{нагр.адс.H2O} = M_{адс.} \cdot A_{макс.\ цик} \cdot C_{в} \cdot \Delta t \qquad (10)$$

де $Q_{нагр.адс.H2O}$ – витрати теплоти на нагрів адсорбованої води, кДж; $M_{адс.}$ – маса адсорбенту, кг; $A_{макс.\ цик}$ – максимальна адсорбція протягом циклу, кг/кг; C_{H2O} – теплоємність води, кДж/кг; Δt – підвищення температури адсорбованої води, °С.

Тоді рівняння теплового балансу

$$Q_{адс.} = M_{H2O} \cdot C_{H2O} \cdot \Delta t + M_{гідр.\ конт} \cdot C_{гідр.\ конт} \cdot \Delta t + \\ + M_{адс.} \cdot C_{адс} \cdot \Delta t ++ M_{адс.} \cdot A_{мах.\ цик} \cdot C_{H2O} \cdot \Delta t \qquad (11)$$

Отже, маса води в контурі та баку складає:

$$M_{H2O} = \frac{Q_{адс} - \Delta t \cdot (M_{гідр.конт} \cdot C_{гідр.конт} + M_{адс} \cdot C_{адс} + M_{адс} \cdot A_{мах.цик} \cdot C_{H2O})}{C_{H2O} \cdot \Delta t} \qquad (12)$$

Температуру води в контурі в кінці адсорбції визначали, як суму температури води в мережі та різниці температур Δt.

Проведен розрахунок маси та температурі води в контурі та в баку після адсорбції за допомогою формул (5) – (11). Результати представлені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку маси та температури води в контурі та в баку після адсорбції.

Δt°C	M_{H2O}, кг	Температура води в кінці адсорбції, °С
35	681,4	50
45	513,2	60
55	406	70
65	332,1	80
75	277,8	90

Вочевидь, при збільшенні різниці температур зменшується маса води. При різниці температур від 65 до 75 температура води в кінці адсорбції дорівнює 70-80°С, маса води складає від 277,8 – 332,1 кг (277,8 – 332,1 л). Таким чином, отриманий теплоносій можливо використовувати для підігріву адсорбента в ранковий період часу.

Висновки

Досліджено експлуатаційні характеристики адсорбційної холодильної геліоустановки на основі композитів «силікагель – натрій сульфат».

Розроблена методика визначення експлуатаційних характеристик, зокрема, площі сонячного колектора та сонячного експлуатаційного коефіцієнта. Сонячний експлуатаційний холодильний коефіцієнт протягом періоду експлуатації складає 0,25 – 0,34.

Запропоновано технологічну схему для утилізації теплоти адсорбції. Показана можливість підігріву води за рахунок теплоти адсорбції від 50 до 90°С при цьому маса води дорівнює від 277 до 681 кг. Показано, що отриманий теплоносій можливо використовувати для підігріву адсорбента «силікагель – натрій сульфат» в ранковий період часу.

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

Література

1. Sah R. P., Choudhury B., Das R. K. A review on adsorption cooling systems with silica gel and carbon as adsorbents // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 45. – P. 123–134

2. Ullah K. R., Saidur R., Ping H.W., Akikur R. K., Shuvo N.H. A review of solar thermal refrigeration and cooling methods //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 24. – P. 499 – 513

3. Girnik I.S., Grekova A.D., Gordeeva L.G., Aristov Yu.I. Dynamic optimization of adsorptive chillers: Compact layer vs. bed of loose grains // Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 125. – P. 823 – 829

4. Deshmukh H., Maiya M. P., Murthy S. S. Continuous vapour adsorption cooling system with three adsorber beds //Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 82. – P. 380 – 389

5. Santori G., Sapienza A., Freni A. A dynamic multi-level model for adsorptive solar cooling //Renewable Energy. – 2012. – Vol. 43. – P. 301 – 312
6. Goyal P., Baredar P., Mittal A., Ameenur. R. Siddiqui. Adsorption refrigeration technology – An overview of theory and its solar energy applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 53. – P. 1389–1410
7. Jiang L., Wang L.W., Luo W.L., Wang R.Z. Experimental study on working pairs for two-stage chemisorption freezing cycle //Renewable Energy. – 2015. – Vol. 74. – P. 287 – 297
8. M.S. Fernandes, G.J.V.N.Brites, J.J.Costa, A.R.Gaspar, V.A.F.Costa. Review and future trends of solar adsorption refrigeration systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 39. – P. 102–123
9. A. Freni, G. Maggio, A. Sapienza, A. Frazzica, G. Restuccia, S. Vasta. Comparative analysis of promising adsorbent/adsorbate pairs for adsorptive heat pumping, air conditioning and refrigeration // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 104. – P. 85 – 95
10. Sukhyy K.M., Belyanovskaya E.A., Sukha I.V., Kolomiyets E.V., Gavrilko A.V., Sukhyy M.P. Solar Adsorptive Chiller based on Composite Sorbent 'Silica Gel – Sodium Acetate', synthesized by Sol – Gel Method // Вопросы химии и химической технологии. – 2015. – Т. 6 (104). – С. 80-86.
11. 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.
12. Руководство по расчету теплового баланса холодильных камер и выбору основных проектных параметров холодильных установок. – М.: Остров, 1999. – 56 с.

Отримана в редакції 18.05.2019, прийнята до друку 07.06.2019

Operation of adsorptive refrigerators based on composites «silica gel - sodium sulphate» for agricultural production storage

***O. A. Belianovska*[1]✉, *G. M. Pustovoi* [1], *K. M. Sukhyi* [1], *M. V. Gubynskii* [2], *M. P. Sukhyi*, *A. V. Doroshenko* [3], *Ya. O. Sergienko*[1]**
[1] SHEI «Ukrainian State University of Chemical Technology», Gagarin Avenue, 8, the city of Dnipro, 49005, Ukraine
[2] National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina avenue, 4, Dnipro, 49005, Ukraine
[3] Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatna str, Odesa, 65039, Ukraine
✉ e-mail: belyanovskaya@voliacable.com

The key problems in the implementation of adsorptive solar regrigerators along with the properties of the adsorbents used are seasonal and daily irregularities of solar radiation, as well as the utilization of heat of adsorption. The purpose of the presented work is to determine the operational characteristics of adsorption refrigeration solar installations based on composite adsorbents "silica gel - sodium sulfate". The main structural elements of the adsorption refrigeration unit are the adsorber, on the front side of which is installed transparent insulation made of cellular polycarbonate plastic CAH (thickness of 8 mm) with an integral transmittance of 0.88, and on the bottom a composite adsorbate is placed, condenser, evaporator, which is installed near the cold box. In the layer of adsorbent a hydraulic circuit on which water circulates is maintained. The heated water can be used to heat the adsorbent in the morning. Operation of the adsorption solar installation takes place in two stages. In the first stage, heat is removed from the cold box due to the evaporation of water in the evaporator. Water vapor diffuses to the adsorber, where it is adsorbed by the composite adsorbent. The second stage corresponds to the regeneration of the adsorbent (desorption). which is carried out by heating it by solar energy to the regeneration temperature. The operational characteristics of a solar adsorption refrigerator based on composites 'silica-sodium sulphate' were studied. A method for determining performance were developed. It involves calculating the amount of heat that should be removed from the chilling chamber, as a sum of the amount of heat removed from the chilling chamber design elements and products introduced into it, as well as compensating heat influx into the chamber, which allows determining the mass of water in the evaporator and the mass of the adsorbent, the heat inputs for the regeneration of the adsorbent, as well as the area of the solar collector and solar net coefficient of performance. It has

been stated that during the operation of the refrigeration unit from May to September, the value of the solar operating refrigeration coefficient is 0.25 – 0.34. A process flowsheet for the utilization of heat of adsorption is proposed. The possibility of heating water due to the heat of adsorption from 50 to 90 ° C is shown, the mass of water being equal to from 277 to 681 kg. It is shown that the obtained heat carrier can be used for warming the adsorbent 'silica gel – sodium sulphate' in the morning period.

Keywords: *Composite Adsorbents, Solar Adsorption Refrigerating Devices, Adsorption, Recycling, Energy Efficiency.*

References

1. Sah, R. P., Choudhury, B., Das, R. K. (2015) A review on adsorption cooling systems with silica gel and carbon as adsorbents. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 123-134. Doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.039

2. Ullah, K.R., Saidur, R., Ping, H.W., Akikur, R.K., Shuvo, N.H. (2013) A review of solar thermal refrigeration and cooling methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 499-513. Doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.024

3. Girnik, I.S., Grekova, A.D., Gordeeva, L.G., Aristov, Yu.I. (2017) Dynamic optimization of adsorptive chillers: Compact layer vs. bed of loose grains. *Applied Thermal Engineering*, 125, 823-829. Doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.141

4. Deshmukh, H., Maiya, M.P., Murthy,S.S. (2015) Continuous vapour adsorption cooling system with three adsorber beds. *Applied Thermal Engineering*, 82, 380-389. Doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.013

5. Santori, G., Sapienza, A., Freni, A. (2012) A dynamic multi-level model for adsorptive solar cooling. *Renewable Energy*, 43, 301-312. Doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.039

6. Goyal, P., Baredar, P., Mittal, A., Ameenur, R. Siddiqui. (2016) Adsorption refrigeration technology – An overview of theory and its solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1389-1410. Doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.027

7. Jiang, L., Wang, L.W., Luo, W.L., Wang, R.Z. (2015) Experimental study on working pairs for two-stage chemisorption freezing cycle. *Renewable Energy*, 74, 287-297. Doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.011

8. Fernandes, M.S., Brites, G.J.V.N., Costa, J.J., Gaspar, A.R., Costa, V.A.F. (2014) Review and future trends of solar adsorption refrigeration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 102-123. Doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.081

9. 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. Doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.036

10. Sukhyy, K.M., Belyanovskaya, E.A., Sukha, I.V., Kolomiyets, E.V., Gavrilko, A.V., Sukhyy, M.P. (2015) Solar Adsorptive Chiller based on Composite Sorbent 'Silica Gel – Sodium Acetate', synthesized by Sol – Gel Method. *Issues of chemistry and chemical engineering*, 6 (104), 80-86.

11. 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.

12. Rukovodstvo po raschetu teplovogo balansa kholodilnykh kamer i vyboru osnovnykh proektnykh parametrov kholodylnykh ustanovok, (1999). Moscow, Ostrov, 56 p. (in Russian).

Received 18 May 2019
Approved 07 June 2019
Available in Internet 30 June 2019