

Беляновська О.А.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Сухий К.М.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Литовченко Р.Д.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Суша І.В.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Сергієнко Я.О.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

ТЕРМІЧНІ МАСИ АДСОРБЦІЙНИХ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ КОМПОЗИТІВ «СИЛІКАГЕЛЬ – НАТРІЙ СУЛЬФАТ» ТА «СИЛІКАГЕЛЬ – НАТРІЙ АЦЕТАТ»

Розглянуто термічні маси теплоакумулюючих пристроїв відкритого та закритого типів на основі композитних адсорбентів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат». Як робочу рідину запропоновано використовувати воду. Допрацьована процедура розрахунку, яка включає визначення теплового навантаження, теплоти адсорбції, маси адсорбенту, а також невід'ємної, конструкційної та питомої термічної маси. Оцінено питомі термічні маси адсорбційних теплоакумулюючих модулів відкритого та закритого типів. Проаналізовано основні фактори, які впливають на їхню величину. Показано, що питома термічна маса адсорбційного теплоакумулюючого модуля істотно зростає завдяки адсорбції води під час розряду пристрою. Показано, що максимальних значень вона досягає наприкінці стадії розряду, коли досягнуто максимальні значення адсорбції в циклі. Підтверджено вплив конструкції теплоакумулюючого модуля на величину питомої термічної маси. Менші значення питомої термічної маси для пристроїв закритого типу є результатом того, що термічна маса пристрою закритого типу включає не лише термічну масу адсорбенту, але й гідравлічного контуру з теплоносієм, який розміщено в шарі адсорбенту. Показано, що максимальні значення цих змін відповідають композитам, які містять 80% солі та 20% силікагелю, завдяки максимальним значенням граничної адсорбції та теплоти адсорбції, що сприяє меншим значенням маси адсорбенту, яка необхідна для покриття теплового навантаження. Порівняно питомі термічні маси адсорбційних модулів на основі композитів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат». Встановлені склад композиту 80% натрій сульфату та 20% силікагелю, який відповідає мінімальним розмірам адсорбційного модуля і, отже, максимальним значенням питомої термічної маси.

Ключові слова: термічна маса, адсорбційне перетворення теплової енергії, композитний адсорбент, адсорбція, гранична адсорбція.

Постановка проблеми. Декарбонізація енергетичного сектора підвищення енергоефективності та енергетичної безпеки є головними напрямками для досягнення ряду кліматичних вимог протягом наступного десятиріччя. Одним з перспективних технічних рішень, яке дозволяє компенсувати неспівпадання періодів активного виробництва та споживання енергії під час експлуатації відновлюваних енергоресурсів є адсорбційне перетворення теплової енергії. Режим експлуатації більшості

адсорбційних перетворювачів теплової енергії передбачає нагрівання та охолодження, які періодично змінюють одне одного [1, с. 3142]. У цих умовах стає ключовим вплив на експлуатацію подібних пристроїв термічної маси, тобто теплоємності пристрою (кДж/К), яка включає добуток його маси та питомої теплоємності [2, с. 52–62]. В літературі та дослідницькій спільноті є доволі чіткий поділ між термічними масами адсорбенту та інших матеріалів. Їх протиставляють, як живу

та мертвої маси, активну та інертну (інертну) масу, хазяїн / гість [3, с. 1150]. Вважають нелогічним поділ на живу та мертву термічні маси, оскільки власне адсорбент має термічну масу. В цій роботі використовується термін лише термічна маса. Існує невід'ємний зв'язок між термічною масою та ефективністю процесів нагрівання або охолодження. Подібна характеристика може бути вирішальною під час проектування адсорбційних пристроїв.

Це вимагає аналізу основних факторів, які впливають на цю характеристику.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існує невіддільний компроміс між термічною масою адсорбційного пристрою та його ефективністю. Так, максимальна ефективність адсорбційного пристрою відповідає нульовій термічній масі, але це призводить до зниження поверхні теплообміну, більш високої тривалості циклу та зниження потужності в порівнянні з менш ефективною конструкцією за більш високою термічною масою.

Demig та інші [4, с. 2381–2403] розглядали термічну масу як ключовий параметр, який впливає на ефективність циклів. Paul та інші [5, с. 0410011] досліджували можливість збільшення ефективності шляхом зниження термічної маси під час впровадження мікроканалних теплообмінників. Li та інші [6, с. 3376–3384] досліджували вплив відношення мас металевих частин реактора та солі в термодинамічній холодильній системі за допомогою термодинамічної моделі та встановили оптимальне масове відношення сорбційної системи тверда речовина – газ близько 5:1. Більш високе відношення призводить до зростання споживання теплоти під час десорбції та виділення теплоти під час адсорбції, без зміни холодопродуктивності, що знижує холодильний коефіцієнт.

Gluesenkamp та інші [3, с. 1150] вважають необхідним розглядати загальну термічну масу, яка є сумою термічних мас адсорбента (тобто невід'ємна) та суми термічних мас теплоносія (НТФ) та конструкційних матеріалів (конструкційна). Невід'ємну термічну масу Gluesenkamp та інші [3, с. 1150] спрощено визначають як добуток маси та теплоємності адсорбента. Водночас термічна маса адсорбента протягом циклу, вочевидь, змінюється в результаті адсорбції робочої речовини, що визначається властивостями адсорбента, але цією зміною переважно нехтують, що припустимо лише у разі незначної адсорбції або низької теплоємності адсорбату. Доцільно порівняти зміну термічної маси адсорбційного теплоакумулюючого модуля протягом циклу.

Постановка завдання. Метою дослідження є встановлення основних факторів, які впливають на термічну масу адсорбційного теплоакумулюючого пристрою. Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

- встановити граничні значення термічних мас теплоакумулюючих пристроїв протягом циклу;
- виявити основні фактори, які впливають на величину термічних мас теплоакумулюючих пристроїв;
- встановити умови, за яких термічна маса адсорбенту сягає максимальних значень.

Виклад основного матеріалу дослідження. Доцільно порівняти термічні маси теплоакумулюючих пристроїв двох типів відповідно до характеру масообміну з навколишнім середовищем – закритого та відкритого.

Приклад подібного пристрою закритого типу наведено на рис. 1. Експлуатація пристрою закритого типу проводиться в двофазному режимі: розряд – адсорбція та заряд – регенерація адсорбенту, тобто десорбція.

Експлуатація пристрою відкритого типу (рис. 1) проводиться також в двофазному режимі, який передбачає стадії розряду (адсорбція) та заряду (десорбція, тобто регенерація адсорбенту). Експлуатація пристрою закритого типу проводиться в двофазному режимі: розряд – адсорбція та заряд – регенерація адсорбенту, тобто десорбція.

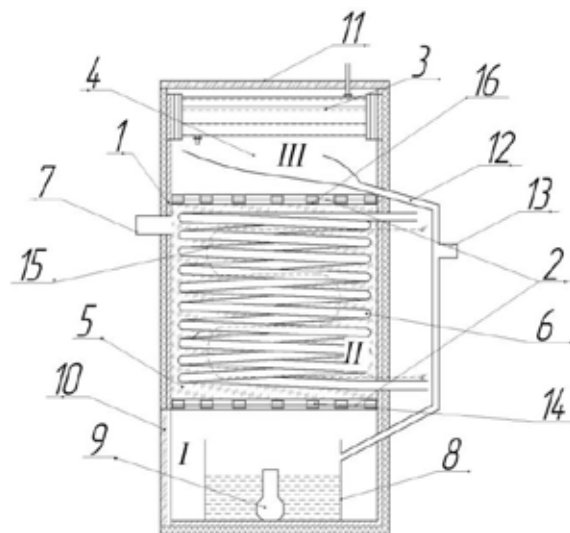


Рис. 1. Конструкція поглинаючого теплоаккумулятора закритого типу

1 – теплоізований корпус; 2 – сітчасті перегородки; 3 – конденсатор; 4 – тарілка для збору конденсату; 5 – адсорбційно-десорбційний реактор; 6 – гідравлічний контур; 7 – патрубок; 8 – резервуар для води; 9 – випарник; 10, 11 – кришки; 12 – трубка; 13 – патрубок; 14 – сталеві жалюзі; 15 – резистивний нагрівальний елемент; 16 – сталеві жалюзі [7, с. 151]

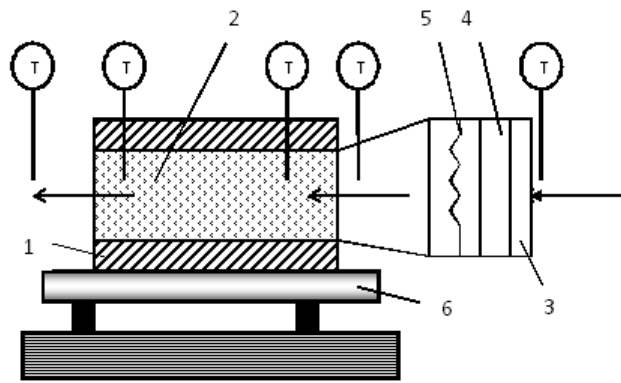


Рис. 2. Тепловий акумулятор відкритого типу

1 – теплоізолюючий корпус; 2 – теплоакumuлюючий матеріал; 3 – компресор; 4 – зволожувач повітря; 5 – елемент опору; 6 – терези [7, с. 159]

Експлуатація пристрою відкритого типу (рис. 2) проводиться також в двофазному режимі, який передбачає стадії розряду (адсорбція) та заряду (десорбція, тобто регенерація адсорбенту). В результаті температура шару адсорбенту зростає до 90–115 °С. Друга стадія (регенерація) здійснюється шляхом подачі гарячого повітря, яке прогріває шар адсорбенту до температур, не менш за 90°С, що сприяє десорбції.

Розрахунок невіддільних термічних мас адсорбційного модуля проводився відповідно до формул, які наведено в роботі [3, с. 1150]

$$TM_{inherent} = m_{ads}c_{ads} \quad (1)$$

$$TM_{inherent} = m_{ads}(c_{ads} + Ac_{ad-te}), \quad (2)$$

де $TM_{inherent}$ – невід’ємна термічна маса адсорбційного модуля, m_{ads} – маса адсорбенту, кг; c_{ads} –

теплоємність адсорбенту; A – адсорбція (кг адсорбату/кг адсорбенту), яка змінюється протягом циклу; добуток $m_{ads}Ac_{ad-te}$ – це термічна маса речовини, яка поглинута адсорбентом.

Термічну адсорбційного пристрою визначали як суму невід’ємної термічної маси та конструкційної, яка включає термічні маси несорбуючих матеріалів, тобто деталей конструкції та теплоносія.

Іншою важливою характеристикою є питома термічна маса (STM) за методикою, яку наведено в [3, с. 1150].

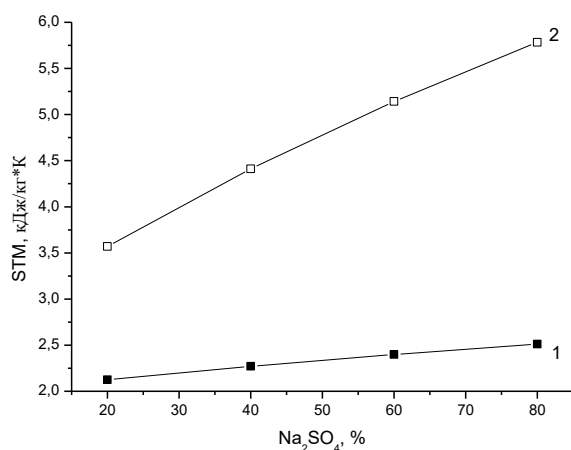
$$STM = \frac{TM}{m_{ads}} \text{ кДж / (К·кг сорбента)}, \quad (3)$$

де TM – питома термічна маса пристрою, кДж/К, m_{ads} – маса адсорбенту, кг.

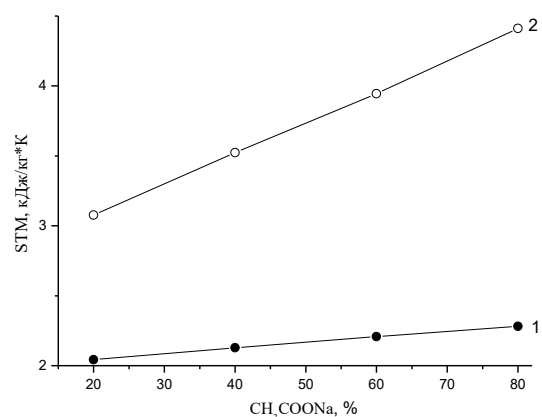
Порівняння питомих термічних мас адсорбційних теплових акумуляторів закритого та відкритого типів наведено на рис. 3 та 4.

Як теплоакumuлюючі середовища використані композити «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат» [8, с. 52–58], які є перспективними середовищами для адсорбційних перетворювачів теплової енергії [9, с. 5611, 10, с. 136–140]. Максимальних значень термічна маса, відповідно до формули (2), буде досягати наприкінці стадії розряду, коли адсорбція близька до граничних значень A_{lim} .

Для пристроїв як відкритого, так і закритого типів максимальні значення питомої термічної маси відповідають адсорбентам, які містять 20% силікагелю та 80% солі (рис. 3, 4).



а



б

Рис. 3. Вплив складу композиту на питому термічну масу теплоакumuлюючого пристрою закритого типу

Композити: а – «силікагель – натрій сульфат», б – «силікагель – натрій ацетат». Питома термічна маса на початку циклу (1) та наприкінці циклу (2). Маса адсорбента розрахована для покриття теплового навантаження 339.5 МДж/на добу

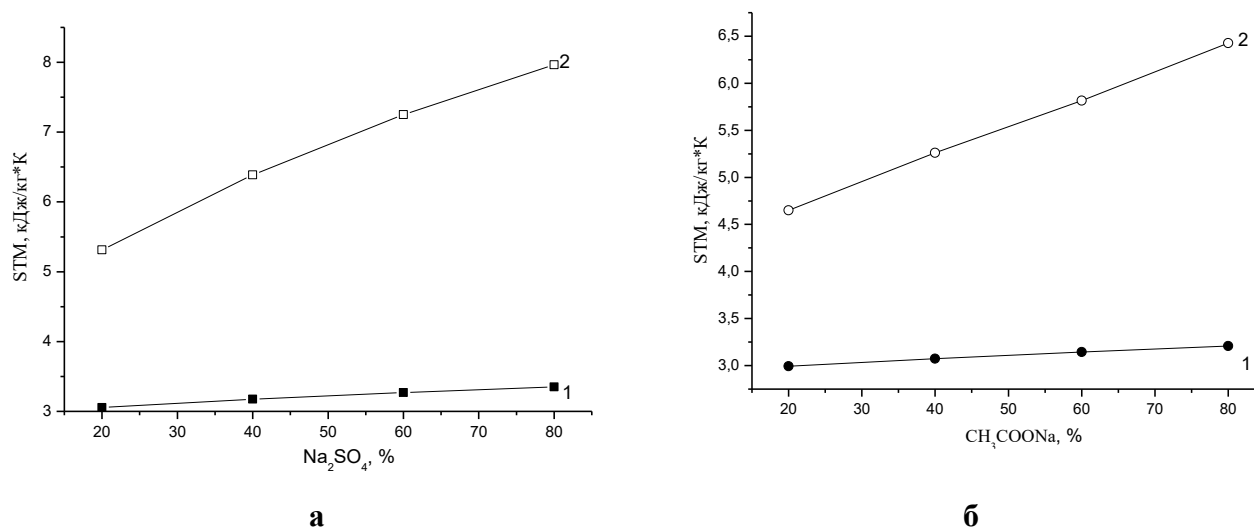


Рис. 4. Вплив складу композита на питому термічну масу теплоакumuлюючого пристрою відкритого типу
Композити: а – «силікагель – натрій сульфат», б – «силікагель – натрій ацетат». Питома термічна маса на початку стадії розряду (1) та наприкінці стадії розряду (2). Маса адсорбенту розрахована для покриття теплового навантаження 339.5 МДж/на добу

Підвищення термічної маси у разі зростання вмісту солі, вочевидь, відповідає підвищенню граничної адсорбції та теплоти адсорбції, що сприяє зниженню маси адсорбенту, яка необхідна для покриття теплового навантаження. Крім того, менша маса адсорбенту сприяє зниженню конструкційної термічної маси завдяки зниженню об'єму адсорбційного модуля.

Висновки. Розглянуто основні фактори, які впливають на термічну масу адсорбційних теплоакumuлюючих пристроїв. Показано зміну термічної маси протягом експлуатації адсорбційних пристроїв на основі композитних адсорбентів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат».

Порівняно питомі термічні маси адсорбційних теплоакumuлюючих пристроїв та показано характер їх змін протягом циклу.

Встановлено, що максимальних значень питомі термічні маси досягають за вмісту в композиті солі 80% та 20% силікагелю. При тому ж складі адсорбенту встановлені найбільші зміни питомої термічної маси, що корелює з максимальними значеннями граничної адсорбції. Максимальних значень питомі термічні маси досягають під час використання композитів «силікагель – натрій сульфат», що відповідає максимальним значенням граничної адсорбції та теплоти адсорбції і, отже, мінімальним розмірам адсорбційного модуля.

Список літератури:

1. Airò Farulla G.; Cellura M.; Guarino F.; Ferraro M. A Review of Thermochemical Energy Storage Systems for Power Grid Support. *Appl. Sci.* 2020. Vol. 10. P. 3142.
2. Sangwon S., Kawakami H., Mikšik F., Takata N., Thu Kyaw, Miyazaki T. Thermodynamic analysis and impact of thermal masses on adsorption cycles using MaxsorbIII/R245fa and SAC-2/R245fa pairs. *International Journal of Refrigeration.* 2021. 123. P. 52–62.
3. Gluesenkamp K. R., Frazzica A., Velte A., Metcalf S., Yang Z., Rouhani M., Corey B., Ming Q., Laurenz E., Rivero-Pacho A., Hinners S., Critoph R., Bahrami M., Fuldner G., Hallin I. Experimentally Measured Thermal Masses of Adsorption Heat Exchangers. *Energies.* 2020. Vol. 13. P. 1150.
4. Demir H.; Mobedi M.; Ülkü S. A review on adsorption heat pump: Problems and solutions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2008. Vol. 12. P. 2381–2403.
5. Paul B.K., Lee K., Wang H. Improving the Energy Efficiency of Adsorption Chillers by Intensifying Thermal Management Systems in Sorbent Beds. *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME.* 2018, Vol. 140, P. 0410011.
6. Li T.X.; Wang R.Z.; Kiplagat J.K.; Wang L.W.; Oliveira R.G. A conceptual design and performance analysis of a triple-effect solid-gas thermochemical sorption refrigeration system with internal heat recovery. *Chem. Eng. Sci.* 2009, Vol. 64. P. 3376–3384.
7. Sukhyy K.M., Belyanovskaya E.A., Sukhyy M.P. Technology Development for Adsorptive Heat Energy Converters: Emerging Research and Opportunities. San Fransisco : IGI-GLOBAL, USA, 2020. 328 pp.

8. Sukhyy K., Belyanovskaya E., Kovalenko V., Kotok V., Sukhyy M., Kolomiyets E., Gubynskyi M., Yeromin O., Prokopenko O. The study of properties of composite adsorptive materials “silica gel – crystalline hydrate” for heat storage devices. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 91, № 1. P. 52–58.

9. Belyanovskaya E.A., Rimár M., Lytovchenko R.D., Variny M.V., Sukhyy K.M., Yeromin O.O., Sykhyy M. P., Prokopenko E. M., Sukha I.V., Gubinskyi M. V., Kizek J. Performance of Adsorptive Heat-Moisture Regenerator Based on Composites ‘Silica Gel – Sodium Sulphate’. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. P. 5611.

10. Белянoвська О.А., Пустовой Г.М., Суха І.В., Скляренко О.І., Сухий М.П., Губинський М.В., Сухий К.М. Експлуатаційні характеристики адсорбційного холодильного модуля парової компресійної холодильної установки. *Вісник Таврійського Національного університету. Сер. Технічні науки*. 2020. № 4. С. 136–140.

Belyanovskaya E.A., Sukhyy K.M., Lytovchenko R.D., Sukha I.V., Serhiienko Ya.O. THERMAL MASSES OF ADSORPTIVE HEAT STORAGE DEVICES BASED ON COMPOSITES “SILICA GEL – SODIUM SULPHATE” AND “SILICA GEL – SODIUM ACETATE”

Thermal masses of heat and storage devices of open and closed types based on composite adsorbents “silica gel – sodium sulphate” and “silica gel – sodium acetate” are considered. It is proposed to use water as a working fluid. The calculation procedure has been improved, which includes the determination of heat load, heat of adsorption, mass of adsorbent, as well as non-negative, structural and specific thermal mass. The specific thermal masses of adsorption heat storage modules of open and closed types are estimated. The main factors influencing their value are analyzed. It is shown that the specific thermal mass of the adsorption heat storage module increases significantly due to the adsorption of water during the discharge of the device. It is shown that it reaches its maximum values at the end of the discharge stage, when the maximum values of adsorption in the cycle are reached. The influence of the heat storage module design on the value of specific thermal mass is confirmed. The lower values of the specific thermal mass for the closed type device are the result of the fact that the thermal mass of the closed type device includes not only the thermal mass of the adsorbent but also the hydraulic circuit with the coolant placed in the adsorbent layer. It is shown that the maximum values of these changes correspond to composites containing 80% salt and 20% silica gel, due to the maximum values of limiting adsorption and heat of adsorption, which contributes to lower values of the adsorbent mass required to cover the heat load. Relatively specific thermal masses of adsorption modules based on composites “silica gel – sodium sulphate” and “silica gel – sodium acetate”. The composition of the composite is 80% sodium sulphate and 20% silica gel, which corresponds to the minimum size of the adsorption unit, and therefore the maximum value of thermal mass.

Key words: thermal mass, adsorptive conversion of heat energy, composite adsorbent, adsorption, maximal adsorption.