

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 662.995 : 662.997

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/26>

Беляновська О.А.

Український державний університет науки і технологій

Сухий К.М.

Український державний університет науки і технологій

Сергієнко Я.О.

Український державний університет науки і технологій

Єрьомін О.О.

Український державний університет науки і технологій

Прокопенко О.М.

Український державний університет науки і технологій

Фролова Л.А.

Український державний університет науки і технологій

ПРОЦЕСИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АДСОРБЦІЙНОГО КОНДИЦІОНЕРА НА ОСНОВІ КОМПЗИТНИХ АДСОРБЕНТІВ «СИЛКАГЕЛЬ – НАТРІЙ СУЛЬФАТ» ТА «СИЛКАГЕЛЬ – НАТРІЙ АЦЕТАТ»

Стаття присвячена дослідженню процесу експлуатації адсорбційного геліокондиціонера на основі композитних адсорбентів «силкагель – натрій сульфат» та «силкагель – натрій ацетат». В статті розкрито основні фактори, які впливають на холодильний коефіцієнт циклу. Підтверджено кореляцію між складом адсорбенту та холодильним коефіцієнтом циклу. Показано зростання холодильного коефіцієнту циклу при підвищенні вмісту натрій сульфату або натрій ацетату в композитному адсорбенті. Підтверджено кореляцію режиму процесу регенерації композита та холодильним коефіцієнтом установки. Встановлено зростання величини холодильного коефіцієнту при зменшенні різниці температур адсорбенту та температури регенерації ΔT_1 . Проаналізовано вплив складу композиту на холодильний коефіцієнт циклу. Показана кореляція режиму процесу регенерації композита та холодильного коефіцієнта установки. Встановлено, що максимальні значення холодильного коефіцієнта відповідають різниці температур адсорбенту та температури регенерації не більше за 55°C для композитів, які містять близько, мас. %: силкагель – 20 та сіль – 80, що відповідає мінімальним розмірам адсорбера. Оцінено експлуатаційний холодильний коефіцієнт адсорбційного кондиціонера на основі композитного сорбенту «силкагель – натрій сульфат» протягом сезону (травень – вересень). Встановлена його залежність від середньодобового значення величини сонячного випромінювання. Порівняні експлуатаційні характеристики адсорбційних геліокондиціонерів на основі композитів «силкагель – натрій сульфат» та «силкагель – натрій ацетат». Показано, що маса композита «силкагель – натрій сульфат» більша ніж в 2 рази менше в порівнянні з композитом «силкагель – натрій ацетат» завдяки більш високій граничній адсорбції, а площа сонячного колектора приблизно на 1 м^2 більше при використанні адсорбенту «силкагель – натрій сульфат». Встановлено, що експлуатаційний холодильний коефіцієнт адсорбційного кондиціонера при використанні композиту «силкагель – CH_3COONa » на 1 % в порівнянні з пристроєм на основі «силкагель – Na_2SO_4 ». Підтверджено перспективність використання композитів «силкагель – натрій ацетат» та «силкагель – натрій сульфат».

Ключеві слова: адсорбційний кондиціонер, композитний адсорбент, гранична адсорбція, хладагент, енергоефективність.

Постановка проблеми. Більша частина енергоспоживання житлових та офісних будівель в літній період припадає на парові компресорні установки для кондиціонування повітря, які є вирішальними для підтримання теплового режиму в приміщеннях, а також комфорту та житлових умов мешканців [1, с. 101275]. Враховуючи динаміку глобального потепління прогнозують, що світове енергоспоживання паровими компресорними кондиціонерами зросте майже в 33 рази до 2100 р. [2, с. 1–15]. Холодильні агенти (фтор-хлор-похідні вуглеводнів), які використовуються в цих установках, мають високий потенціал глобального потепління [3, с. 139315]. До того ж, об'єднання процесів охолодження та осушення повітря призводить до значних втрат енергії та значних викидів діоксида вуглецю. Це спонукає до пошуку альтернативних, екологічно більш безпечних, технічних рішень. Перспективним варіантом в цих умовах стають адсорбційні установки [1, с. 101275]. До їх переваг слід віднести стійкість до вібрацій, практичну відсутність рухомих частин, а також невелику вартість та простоту експлуатації системи. До обмежень цих пристроїв можна віднести великі габаритні розміри та низьку холодопродуктивність. Важливими факторами, які визначають продуктивність даних установок, характеристики адсорбента та робочої рідини – адсорбата.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Адсорбційні установки для охолодження включають холодильну камеру, випарник, за допомогою якого відводиться теплота від охолоджуваного середовища, конденсатор, адсорбер, заповнений адсорбентом, поглинає робочу речовину (холодоагент, тобто адсорбат), а також пристрій для підведення теплоти при регенерації адсорбента, наприклад, сонячний колектор [4, с. 165–171]. Експлуатація пристрою передбачає два етапи: отримання холоду та регенерація адсорбенту.

В якості робочих рідин в адсорбційних кондиціонерах використовують воду або метанол [5, с. 85–95]. Як адсорбенти використовують силікагелі, цеоліти та активоване вугілля [5, с. 85–95]. В той же час, недоліком подібних адсорбентів є низька адсорбційна ємність. Наприклад, 0,3 кг води на 1 кг цеоліта [6, с. 253–276]. Як більш перспективний варіант розглядають композитні адсорбенти, які отримані шляхом імпрегнування гідратуотворюючих солей (наприклад, кальцій хлорид, магній сульфат, літій хлорид) в поринну матрицю цеоліта, силікагелю, вермікуліту [7, с. 112938]. Але подібні методи не дозво-

ляють отримати композит протягом одного циклу. Альтернативним варіантом отримання композитів типу «сіль в поринній матриці» є золь – метод [8, с. 136–140]. Було б доцільно оцінити ефективність адсорбційних установок для кондиціонування повітря на основі композитних адсорбентів.

Постановка завдання. Мета роботи – оцінити ефективність адсорбційних кондиціонерів на основі композитів «силікагель – кристалогідрат». Для досягнення даної мети поставлені наступні задачі:

- визначити основні конструктивні та експлуатаційні характеристики пристрою;
- оцінити основні критерії ефективності роботи адсорбційного кондиціонера;
- порівняти вплив основних факторів, які впливають на ефективність експлуатації пристрою;
- запропонувати режим для ефективної експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Конструкція адсорбційного сонячного кондиціонера наведена на рис. 1.

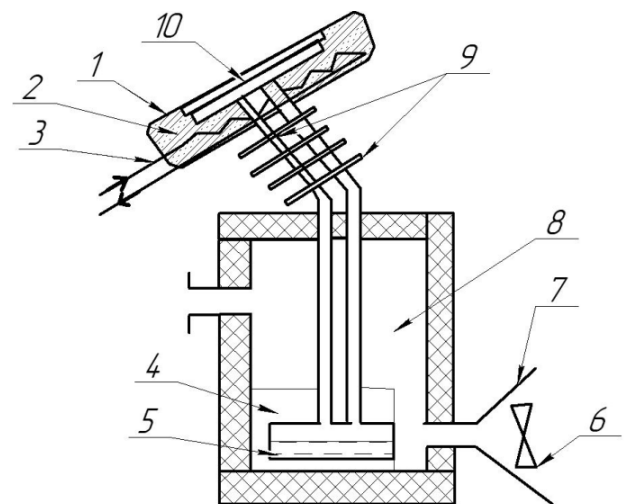


Рис. 1. Адсорбційний кондиціонер: 1 – адсорбер; 2 – теплоакumuлюючий матеріал (адсорбент); 3 – гiдрaвлiчний контур; 4 – водяний акумулятор холоду; 5 – випарник; 6 – вентилятор; 7 – кожух; 8 – холодильна камера; 9 – конденсатор; 10 – прозорий стiльнийковий полiкарбонатний пластик

Основні його модулі включають адсорбер (1), об'єднаний з сонячним колектором, конденсатор (9) та випарник (5), який розміщено в холодильній камері (8). Для зменшення впливу погодних умов на час регенерації в шарі адсорбенту встановлено гiдрaвлiчний контур (3). Холодильна камера об'ємом 3 м³ виготовлена із сталі марки 30Х товщиною 0,5 мм. В якості теплоізоляції використовували пінополістирол.

Адсорбційного кондиціонер, подібно холодильнику, працює відповідно до термодинамічного циклу, який включає стадії адсорбції та випаровування води (власне виробництва холоду), підігрів адсорбента до температури регенерації, десорбції, охолодження адсорбента до температури початку адсорбції.

Водяна пара починає дифундує через конденсатор-адсорбера, депоглинається шаром адсорбента, що сприяє випаровуванню води в випарнику (5), і, отже, відведенню теплоти від холодильної камери (8), і, отже, від охолоджуваного повітря, який прокачується через холодильну камеру за допомогою вентилятора (6). Через великий об'єм води, що міститься в стінках холодильної камери та акумуляторі холоду (4), температура в ній підтримується на рівні 5–10°C протягом 10–20 годин, поки не почнеться наступний цикл. Температура в адсорбері (1) значно зростає за рахунок адсорбції води адсорбентом (2). Для відведення цього тепла вода подається до контура (3). Гаряча вода може бути підведена споживачеві в систему гарячого водопостачання або опалення або використовується для регенерації адсорбційного матеріалу на другому етапі роботи кондиціонера.

Далі, адсорбент (2) нагрівається за допомогою сонячної енергії та/або пропускаючи через контур (3) гарячу воду, нагріту на першій стадії. Отже, вплив погодних умов на час відновлення матеріалу зменшується. Вода збирається в конденсаторі (9) і стікає до випарника (5). Потім починається процес охолодження.

Кількість теплоти, яке необхідно відібрати від охолоджуваного повітря, можна розрахувати за традиційною методикою [9, с. 1–147] як суму теплоти, яка необхідна для компенсації загальних теплоприпливів до приміщення, які виникають за рахунок:

- 1) різниці температур в приміщенні та зовнішнього повітря, а також сонячної радіації;
- 2) експлуатації оргтехніки та побутових приладів;
- 3) людей, які знаходяться в приміщенні.

До підрахованих теплонадходжень додається 20% на невраховані теплоприпливи. Отримана кількість теплоти і приймається, як теплота відведена в холодильній камері. Враховуючи це, визначають масу води, з урахуванням теплоти випаровування води (ΔH_{ev} , кДж/кг) аналогічно адсорбційним холодильним установкам [10, с. 268]:

$$M_{H_2O} = (Z_B \cdot Q_2) / H_{ev}, \text{ kg} \quad (1)$$

де Z_B – коефіцієнт покриття. Для підтримки безперервної роботи пристрою приймається 1,05 [10, с. 268].

Для компенсації добової мінливості метеорологічних умов маса робочої рідини збільшується на 50%.

Масу адсорбенту визначають як відношення маси води та граничної адсорбції

Витрати теплоти на регенерацію включають витрати теплоти на підігрів адсорбента та адсорбованої води та десорбцію [10, с. 268]:

$$Q_1 = m_k \cdot C_k \cdot \Delta T_1 + m_w \cdot C_w \cdot \Delta T_1 + m_B \cdot \Delta H_{des}, \text{ кДж} \quad (2)$$

де ΔT_1 – різниця між температурою адсорбенту і температурою регенерації, К; ΔH_{des} – теплота десорбції води, кДж/кг; m_k і m_w – відповідно маса композиту і адсорбованої води, кг; C_k і C_w – теплоємність композиту та води відповідно, кДж / кг · К.

Теплоту для регенерації адсорбента можна постачати за допомогою сонячного колектора. Необхідна площа поверхні сонячного колектора обчислюється за формулою [10, с. 269]:

$$F_k = (Z_k \cdot Q_3) / Q_k, \text{ м}^2 \quad (3)$$

де Z_k – коефіцієнт покриття площі поверхні сонячного колектора, він вводить поправку безперервної роботи холодильника при несприятливих погодних умовах. Залежно від регіону коефіцієнт покриття можна прийняти за 1,5–2,5 (при розрахунках прийнято 2,0). Q_k – кількість теплоти, яка підводиться до адсорбенту на 1 м² площі поверхні колектора, кДж / м².

Основні конструктивні характеристики сонячного колектора, розраховані за рівнянням (1) – (3) для різних холодопродуктивностей представлені в таблиці 1.

Маса адсорбента для заданої холодопродуктивності, вочевидь, майже в два рази більше для композиту «силікагель – натрій ацетат», оскільки його гранична адсорбція майже в два рази менше, ніж у композита «силікагель – натрій сульфат». Витрати теплоти на регенерацію адсорбентів є практично ідентичними, але необхідна маса композита «силікагель – натрій сульфат» менше в два рази, що вимагає менших витрат на його нагрівання, і, отже дещо менших значень площі сонячного колектора.

Критеріями ефективності експлуатації адсорбційного кондиціонеру можуть слугувати холодильні коефіцієнти [10, с. 270–271]:

1) холодильний коефіцієнт циклу, який дорівнює відношенню кількості відведеної теплоти до витрат теплоти на регенерацію;

**Базові характеристики адсорбційного кондиціонера.
Різниця між температурою адсорбенту і температурою регенерації 30 К**

Холодопродуктивність, МДж/добу	Маса води, кг	Адсорбент	Маса адсорбента, кг	Площа сонячного колектора, м ²
358	225,57	Силікагель 20 % – натрій сульфат 80 %	217,56	85,33
		Силікагель 20 % – натрій ацетат 80 %	408,56	85,98
179	112,79	Силікагель 20 % – натрій сульфат 80 %	107,83	42,66
		Силікагель 20 % – натрій ацетат 80 %	202,48	42,98
89,5	56,39	Силікагель 20 % – натрій сульфат 80 %	53,91	21,33
		Силікагель 20 % – натрій ацетат 80 %	101,24	21,49

2) експлуатаційний (сонячний) холодильний коефіцієнт, який визначають як відношення кількості відведеної теплоти та теплоти, яку підведено за допомогою сонячного колектора.

Характеристики композитних адсорбентів сильно впливають на холодильний коефіцієнт. Наприклад, максимальні значення COP_c адсорбційного кондиціонера 1,07–1,11 встановлені для композитних адсорбентів, які містять, мас. %: силікагель – 20 та натрій сульфат натрію – 80.

Вочевидь, підвищення вмісту натрію сульфату в композиті призводить до зменшення його маси, а отже, і кількості тепла, яке потрібно для регенерації. Кількість тепла, яка необхідна для регенерації композиту, визначається різницею температур регенерації та адсорбенту після адсорбції ΔT_1 . Отже, її зменшення приводить до монотонного зростання холодильного коефіцієнта. Максимальні значення COP_c встановлені при ΔT_1 не більше 55–65°C.

Результати розрахунку експлуатаційного холодильного коефіцієнта представлені в таблиці 2, проведені за методикою [10, с. 267–273].

Максимальні значення COP_n спостерігаються у вересні, що відповідає мінімальному сонячному потоку. Вочевидь, основні конструктивні та експлуатаційні характеристики сонячного адсорбційного кондиціонера, які і холодильної установки визначаються властивостями композитного адсорбента.

На холодильний коефіцієнт сильно впливає кількість тепла для регенерації композиту Q_{reg} і, як наслідок, різниця в температурі адсорбенту та температурі регенерації ΔT_1 , яка визначається температурою регенерації (таблиця 3).

По мірі зменшення вмісту силікагелю спостерігається монотонне зростання холодильного коефіцієнту циклу. Максимальні значення COP встановлюються при $\Delta T_1 = 50^\circ\text{C}$ або 20–30°C при використанні композиту «силікагель – натрію сульфат» або «силі-

кагель – натрію ацетат». При застосуванні адсорбентів з нижчими температурами регенерації, наприклад, «силікагель – натрію ацетат» (60°C), можна досягти зменшення теплоти регенерації порівняно з «силікагелем – натрію сульфат» (90°C). Значення експлуатаційного COP для адсорбційних кондиціонерів на основі обох композитів майже рівні.

Таблиця 2

Експлуатаційні холодильні коефіцієнти сонячного адсорбційного кондиціонера на основі композиту «силікагель – натрій сульфат» (різниця температури регенерації та адсорбенту після адсорбції $\Delta T_1 = 55^\circ\text{C}$, холодопродуктивність 3,1 кВт, площа сонячного колектора 22,2 м²)

Місяць	Добовий потік сонячної радіації, МДж/м ²	Теплота, отримана сонячним колектором, МДж	Експлуатаційний холодильний коефіцієнт
Травень	21,56	478,632	0,187
Червень	21,09	468,198	0,191
Липень	21,81	484,182	0,185
Серпень	20,37	452,214	0,198
Вересень	15,87	352,314	0,254

Тим не менше, COP_n адсорбційних холодильників на основі композитного «силікагелю – натрію ацетату» перевершує пристрої, що використовують «силікагель – натрію сульфат», майже на 1%. Очевидно, що це обумовлено нижчою температурою регенерації композитного «силікагелю – натрію ацетату» порівняно з «силікагелем – натрію сульфатом» (Na₂SO₄). В той же час, для досягнення необхідних значень холодопродуктивності протягом циклу маса композиту «силікагель – натрій сульфат» в два рази менше в порівнянні з композитом «силікагель – натрій ацетат», що є результатом більшого значення граничної адсорбції.

Експлуатаційні холодильні коефіцієнти адсорбційних кондиціонерів на основі композитів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат»

Склад, %		«Силікагель – натрій сульфат»					«Силікагель – натрій ацетат»				
Силікагель	Сіль	Гранична адсорбція, A_{max} , кг/кг	Маса адсорбента, M_{ads} , kg	Теплота регенерації, Q_{reg} , МДж	Площа поверхні сонячного колектора, m^2	Експлуатаційний холодильний коефіцієнт, COP_n	Гранична адсорбція, A_{max} , кг/кг	Маса адсорбента, M_{ads} , kg	Теплота регенерації, Q_{reg} , МДж	Площа поверхні сонячного колектора, m^2	Експлуатаційний холодильний коефіцієнт, COP_n
20	80	1.35	41,77	175,77	22,15	0,255	0.756	74,59	169,81	21,40	0,264
40	60	1.06	53,20	176,34	22,22	0,254	0.596	94,61	170,35	21,47	0,263
60	40	0.77	73,23	177,33	22,34	0,252	0.462	122,06	171,09	21,56	0,262
80	20	0.48	117,48	179,52	22,62	0,249	0.330	170,88	172,41	21,73	0,260

Висновки

1. Проведено дослідження процесів експлуатації адсорбційного геліокондиціонера на основі композитних адсорбентів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат». Визначено основні фактори, які впливають на холодильний коефіцієнт циклу.

2. Показана кореляція між складом адсорбенту та холодильним коефіцієнтом циклу. Показано збільшення холодильного коефіцієнту циклу при зростанні вмісту натрій сульфату в композиті. Підтверджено кореляцію режиму процесу регенерації композита та холодильним коефіцієнтом установки. Встановлено зростання величини холодильного коефіцієнту при зменшенні різниці температур адсорбенту та температури регенерації ΔT_1 .

3. Встановлено, що максимальні значення холодильного коефіцієнта спостерігалися відповідають $\Delta T_1 = 55^\circ\text{C}$ для композитів, які містять близько, мас. %: силікагель – 20 та натрій сульфат – 80. Проведено розрахунок експлуатаційного холодильного коефіцієнта на основі композитного сорбенту «силікагель – натрій сульфат», що показала залежність від середньодобового значення величини сонячного випромінювання протягом сезону (травень – вересень).

4. Підтверджено перспективність використання композитів «силікагель – CH_3COONa » та «силікагель – натрій сульфат». Встановлено оптимальний склад композиту, 80% солі та 20% силікагелю, який відповідає мінімальним розмірам адсорберу.

Список літератури:

1. Wajid N.M., Abidin A.M.Z., Hakemzadeh M., Jarimi H., Fazlizan A., Fauzan M.F., Ibrahim A., Al-Waeli A.H.A., Sopian K. Solar adsorption air conditioning system – Recent advances and its potential for cooling an office building in tropical climate. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 27. P. 101275.
2. United Nations Environment Programme, The importance of energy efficiency in the refrigeration and heat pump sectors. *Environ. Program. Brief. Note A*. 2018. no. May. P. 1–15.
3. Lakshmanan S., Maurya V.K., Kumar A., Bhati M. Mitigation potential of banned hydrofluorocarbons (HFCs) towards global warming – An assessment of Kigali Amendment in the Indian scenario. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 428. P. 139315
4. Беляновська, О. А., Пустовой, Г. М., Сухий, К. М., Губинський, М. В., Сухий, М. П., Дорошенко, О. В., Сергієнко, Я. О. Експлуатація адсорбційних холодильних установок на основі композитів «силікагель – натрій сульфат» для зберігання сільськогосподарської продукції. Холодильна техніка та технологія. 2019. Т. 55(3). С. 165–171.
5. Freni, A., Maggio, G., Sapienza, A., Frazzica, A., Restuccia, G., Vasta, S. Comparative analysis of promising adsorbent/adsorbate pairs for adsorptive heat pumping, air conditioning and refrigeration. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 104. P. 85–95
6. Jarimi H., Powell R., Riffat S. Review of sustainable methods for atmospheric water harvesting. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2020. Vol. 15. P. 253–276.
7. Wenjing W., Luxi Y., Giulio S., Yongliang L., Cher H. L., Xianfeng F. A two-stage sorption strategy to improve heat storage performance of salt/porous matrix composites. *Solar Energy*. 2024. Vol. 282. P. 112938.

8. Беляновська О.А., Сухий К.М., Пустовой Г.М., Єршомін А.О., Сухий М.К., Фролова Л.А. Критерії підбору робочих пар для адсорбційних холодильних пристроїв. *Вчені записки Таврійського Національного університету. Сер. Технічні науки*. 2022. № 6. С. 136–140.

9. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлового господарства України. 1996. 147 с.

10. Sukhyu K.M., Belyanovskaya E.A., Sukhyu M.P. Technology Development for Adsorptive Heat Energy Converters: Emerging Research and Opportunities. San Francisco, USA, 2020. 328 pp.

Belyanovskaya E.A., Sukhyu K.M., Serhienko Ya.O., Yeromin A.O., Prokopenko O.M., Frolova L.A. OPERATIONAL PROCESSES OF ADSORPTION CONDITIONER BASED ON “SILICA GEL – SODIUM SULFATE” AND “SILICA GEL – SODIUM ACETATE” COMPOSITE ADSORBENTS

The article is focused on the study of the processes of operation of the adsorption solar conditioner based on composite adsorbents 'silica gel – sodium sulfate' and 'silica gel – sodium acetate'. The main factors affecting the coefficient of energy performance for cooling of the cycle have been revealed in the present article. The correlation between the composition of the adsorbent and the coefficient of energy performance for cooling of the cycle was confirmed. It is shown that the coefficient of energy performance for cooling of the cycle increases when the content of sodium sulfate or sodium acetate in the composite adsorbent is increased. The correlation of the mode of the composite regeneration process and the coefficient of energy performance for cooling of the device was confirmed. An increase in the value of the coefficient of energy performance for cooling was established with a decrease in the temperature difference of the adsorbent and the regeneration temperature ΔT_1 . The influence of the composition of the composite on the coefficient of energy performance for cooling of the cycle was analyzed. The correlation of the mode of the composite regeneration process and the coefficient of energy performance for cooling of the installation is shown. It was established that the maximum values of the coefficient of energy performance for cooling correspond to the difference between the temperature of the adsorbent and the temperature of regeneration no more than 55°C for composites containing about, wt. %: silica gel – 20 and salt – 80, which corresponds to the minimum size of the adsorber. The operational coefficient of energy performance for cooling of the adsorption conditioner based on the composite adsorbent 'silica gel – sodium sulfate' during the season (May – September) was evaluated. Its dependence on the average daily value of solar radiation is established. The operational characteristics of adsorption air conditioners based on 'silica gel – sodium sulfate' and 'silica gel – sodium acetate' composites are compared. The mass of the composite 'silica gel – sodium sulfate' is shown to be more than 2 times less compared to the composite 'silica gel – sodium acetate' due to higher maximal adsorption, and the area of the solar collector is approximately 1 m² more when the adsorbent silica gel – sodium sulfate' used. The operational coefficient of energy performance for cooling of the adsorption conditioner when the composite 'silica gel – CH₃COONa' used is stated to be one-percent more as compared to the device based on 'silica gel – Na₂SO₄'. The prospects of using 'silica gel – sodium acetate' and 'silica gel – sodium sulfate' composites have been confirmed.

Key words: adsorptive conditioner, composite adsorbent, maximal adsorption, refrigerant, energy efficiency.