

crystals.

**Keywords:** complete factorial experiment; tetraethoxysilane; hydrolysis; photonic crystal; silicon (IV) oxide.

#### REFERENCES

1. Stober W., Finc A., Bohn E. Controlled growth of monodisperse silica spheres in the micron size range. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1968, vol. 26, no. 1, pp. 62-69.

2. Trofimova E.Yu., Aleksenskii A.E., Grudinkin S.A., Korkin I.V., Kurdyukov D.A., Golubev V.G. Vliyanie predvaritel'noi obrabotki tetraetoksisilana na sintez kolloidnykh chastits amorfnoho dioksida kremniya [The effect of preliminary treatment of tetraethoxysilane on the synthesis of the particles of amorphous silica]. *Kolloidnyi Zhurnal*, 2011, vol. 73, no. 4, pp. 535-539. (in Russian).

3. Potapov V.V., Kamashev D.V. Sintez blagorodnogo opala v gidrotermal'nom rastvore [The synthesis of noble opal in a hydrothermal solution]. *Fizika i Khimiya Stekla*, 2006, vol. 32, no. 1, pp. 124-136. (in Russian).

4. Bogush G.H., Tracy M.A., Zukoski C.F. Preparation of monodisperse silica particles: control of size mass fraction. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1988, vol. 104, no. 1, pp. 95-106.

5. Masalov V.M., Sukhinina N.S., Emel'chenko G.A. Kolloidnye chastitsy dioksida kremniya dl'ya formirovaniya opalopodobnykh struktur [Colloidal particles of silica for the formation of opal-like structures]. *Fizika Tverdogo Tela*, 2011, vol. 53, no. 6, pp. 1072-1076. (in Russian).

6. Baryshev A.V., Kaplyanskii A.A., Kosobukin V.A. Photonic bandgap structure: from spectroscopy towards visualization. *Physical Review B*, 2004, vol. 70, pp. 113104-1-113104-4.

УДК 644.1

О.В. Коломієць, К.М. Сухий, О.А. Беляновська, В.І. Томіло, М.П. Сухий

## ТЕХНОЛОГІЯ РЕГЕНЕРАЦІЇ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНОГО ТЕПЛА ТА ВОЛОГИ КОМПОЗИТНИМ СОРБЕНТОМ «СИЛКАГЕЛЬ–НАТРІЙ СУЛЬФАТ»

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро

В даній роботі надано конструктивне виконання сорбційного регенератора тепла та вологи, описано його експлуатацію та результати натурних випробувань. Запропонована технологія регенерації низькопотенційного тепла та вологи композитним сорбентом «силікагель–натрій сульфат». Описано синтез композитного сорбенту «силікагель–натрій сульфат». Наведено експериментальні графіки зміни температури, абсолютної та відносної вологості повітря на вході та виході з апарата і між насадками з композитом. Встановлена кореляція часу перемикання потоків, витрати повітря та температурного перепаду. З достатньою для інженерних розрахунків точністю описано залежність коефіцієнта регенерації тепла від безрозмірного перепаду температур і залежність коефіцієнта регенерації вологи від безрозмірного перепаду абсолютної вологості повітря. Показано можливість цілеспрямовано змінювати вищезгадані коефіцієнти в досить широких діапазонах змінюючи час напівциклу, розмір гранул сорбенту та його кількість. Результати дослідження можуть бути використані при розробці енергозберігаючих вентиляційних систем для житлових і складських приміщень.

**Ключові слова:** композитний сорбент, низько-потенційне тепло, сорбційний регенератор тепла, коефіцієнт регенерації вологи, коефіцієнт регенерації тепла.

### Вступ

Одним з перспективних напрямів використання композитних сорбентів є їх застосування для регенерації тепла та вологи. Подібні пристрої є перспективними для підтримання необхідного рівня вологості в вентилярованому приміщенні та регенерації тепла [1], що може істотно знизити енергозатрати на нагрів приточного повітря.

Найпростішим рішенням даної проблеми є використання теплого повітря, яке виходить з приміщення, для нагрівання приточного холодного повітря. Для цього зазвичай використовують теплообмінники рекуперативного та реге-

неративного типів [2]. Але використання теплообмінників не вирішує проблем пов'язаних з наявністю значної кількості вологи в повітрі, яка покидає приміщення, що призводить до утворення льоду на холодному кінці теплообмінника та блокує його роботу. При цьому відбувається порушення балансу вологи в приміщенні, так як з приміщення видаляється більше вологи, ніж вноситься, що призводить до зниження вологості в приміщенні, яке негативно впливає на самопочуття людини.

Метою роботи є дослідження експлуатаційних характеристик сорбційного регенератора теплоти та вологи на основі композитного



останції «Coastal Environmental Systems C-5 S1019RB».

Для здійснення досліджень пристрій довжиною 0,6 м, конструктивне виконання якого зображено на рис. 1, встановлено у вентиляційний канал. Холодним вважається той кінець, який знаходиться ззовні, теплим – всередині приміщення яке вентилюється.

Для зняття кривих зміни температури в часі та визначення часу встановлення рівноважної температури як при роботі в режимі «подача» так і в режимі «викид» спочатку вмикали вентилятор 2, який подавав повітря при температурі 0°C і вимірювали температуру повітря в залежності від часу після кожної касети з теплоаккумуляційним матеріалом. Після встановлення рівноваги вентилятор 2 вимикали і вмикали вентилятор 3, який подавав повітря з кімнати, температура якого становила 20°C.

#### Результати та їх обговорення

Принцип дії сорбційних регенераторів теплоти та вологості базується на періодичному повторенні адсорбції та десорбції, в залежності від відхилення вологості повітря від рівноважних значень.

Для вибору ефективного режиму експлуатації спочатку проведено дослідження, спрямоване на визначення часу, за який температура на холодному кінці регенератора зрівнюється з температурою на гарячому кінці при роботі апарату в режимі «подача» та навпаки, при роботі в режимі «викид».

Типові криві нагріву та охолодження повітря в сорбційному регенераторі теплоти наведено на рис. 2. Зареєстровані температурні залежності для теплового кінця регенератора (1), повітря між касетами з сорбентом (2) та холодного кінця регенератора (3) мають екстремальний характер. Перша ділянка (охолодження), яка відповідає режиму «подача», триває близько 30 хв. За цей час температура знижується від 20 до 0–2°C, яка залишається сталою близько 5 хв Далі, тобто через 35 хв після початку роботи регенератора, змінювали режим з «подачі» на «викид». Це викликало зростання температури протягом 1–5 хв до 18–20°C. Далі температура залишається майже сталою протягом наступних 25–30 хв. Таким чином, час перемикання потоків ( $\Delta t$ ) 35 хв достатньо як для повного охолодження апарату до 0°C, так і для його нагріву до 20°C.

Але повне охолодження і нагрів є недостатніми для створення комфортних умов в приміщенні, оскільки тривалий час в кімнату буде надходити холодне повітря, що призведе до зниження загальної температури в кімнаті. Отже, щоб умови були дійсно комфортними, треба, зважаючи на різницю температур на гарячому і

холодному кінцях регенератору, змінювати час перемикання потоків. Це дасть можливість обрати прийнятний для кожного споживача режим роботи.

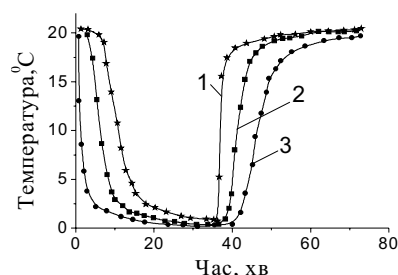


Рис. 2. Типові криві охолодження та нагріву повітря в сорбційному регенераторі: 1 – температура теплового кінця регенератора, °C; 2 – температура між касетами з сорбентом, °C; 3 – температура холодного кінця регенератора, °C

В період з 10 січня по 25 лютого 2015 р. проводилися натурні випробування регенератора, усереднені результати яких показано на рис. 3. Для порівняння наведена і розрахункова залежність (рис. 3 крива 1), розрахована для ступінчастого теплового фронту за формулою

$$\Delta\tau = \frac{cm}{c'_v V}, \quad (1)$$

де  $c$  – масова питома теплоємність сорбційного матеріалу, Дж/кг·К;  $c'_v$  – об'ємна питома теплоємність повітря, Дж/м<sup>3</sup>·К;  $m$  – маса насадки, кг;  $V$  – об'ємна витрата повітря, м<sup>3</sup>/год.

Встановлено, що в стаціонарному режимі час перемикання потоків залежить від витрати повітря та перепаду температур  $\Delta T$  між гарячим та холодним кінцями регенератора (рис. 3). При перепадах температур  $\Delta T=5-10^\circ\text{C}$  зі зростанням витрати повітря час перемикання потоків зменшується (рис. 3, криві 2–4). При  $\Delta T=2,5^\circ\text{C}$   $\Delta t$  практично не залежить від витрати повітря, що вказує на пологість теплового фронту. При збільшенні перепаду температур спостерігається швидке зростання часу перемикання потоків. Цей ефект найбільш характерен для малих швидкостей. Так, при  $V=5$  м<sup>3</sup>/год  $\Delta t$  дорівнює 80 с при  $\Delta T=2,5^\circ\text{C}$ , а при  $\Delta T=10^\circ\text{C}$  – майже в 18 разів більше,  $\Delta t=1360$  с. Але при збільшенні витрати повітря до 25 м<sup>3</sup>/год ця різниця значно менша: при  $\Delta T=2,5^\circ\text{C}$   $\Delta t$  складає 90 с, а при  $\Delta T=10^\circ\text{C}$   $\Delta t = 380$  с.

Зростанням  $\Delta T$ , коли в процес теплообміну вступає значна частина сорбенту, залежність  $\Delta t$  від температури наближається до гіперболічної, яка описана співвідношенням (1).

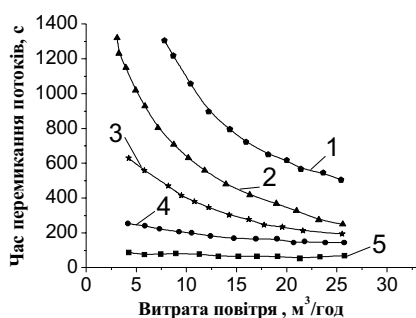


Рис. 3. Залежність часу перемикання потоків  $\Delta t$  від витрати повітря: 1 – результат розрахунку за формулою (1); 2 –  $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $\Delta T=7,5^{\circ}\text{C}$ ; 4 –  $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ ; 5 –  $\Delta T=2,5^{\circ}\text{C}$

При тестуванні регенератора, крім часу перемикання потоків, фіксували зміну температури, абсолютної та відносної вологості повітря на вході та виході з апарату і між насадками з композитом. Усереднені результати випробувань наведено на рис. 4–6. Апарат працював у стаціонарному режимі при сталій витраті повітря в  $30 \text{ м}^3/\text{год}$ , при  $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ . Всі наведені залежності мають періодичний характер, який відповідає зміні напрямів потоків повітря. Підвищення абсолютної та відносної вологості, а також температури повітря на виході з апарату відповідає потоку повітря, спрямованого з кімнати назовні. Зниження цих величин на виході з апарату спостерігається при спрямуванні повітряного потоку з навколишнього середовища до приміщення. Подібним чином змінюються ці величини при вході в апарат, але в значно меншому діапазоні. Найбільша амплітуда спостерігається на графіку зміни температури повітря між насадками, це пояснюється тим, що процеси тепломасообміну в насадках ускладнені перебігом сорбційно-десорбційних процесів.

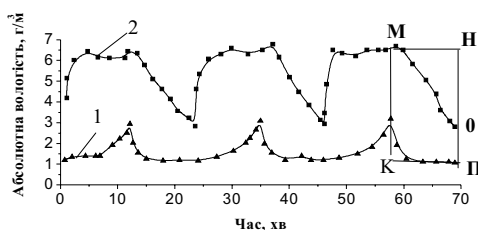


Рис. 4. Зміна абсолютної вологості в ході роботи сорбційного регенератора: 1 – на теплому кінці; 2 – на холодному кінці апарата

Важливими експлуатаційними характеристиками сорбційного регенератора є, вочевидь, коефіцієнти регенерації вологи та тепла, які дорівнюють відповідно відношенню фактично підведених кількості вологи та теплоти до їх максимально можливих значень.

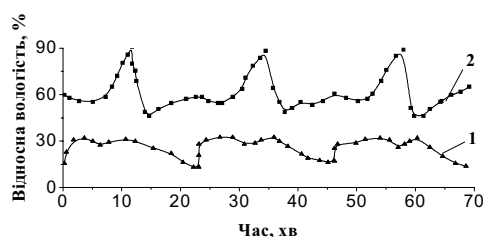


Рис. 5. Зміна відносної вологості в ході роботи сорбційного регенератора: 1 – на теплому кінці; 2 – на холодному кінці апарату

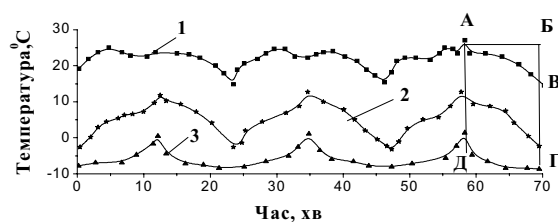


Рис. 6. Зміна температури в ході роботи сорбційного регенератора: 1 – теплому кінці апарату; 2 – між насадками з сорбентом; 3 – на холодному кінці апарата

За аналогією з роботою [4], коефіцієнт регенерації вологи  $K_B$  розраховано як відношення площ  $S_{\text{МОПК}}/S_{\text{МНПК}}$  (рис. 4), а коефіцієнт регенерації тепла  $K_T$  – як  $S_{\text{АВГД}}/S_{\text{АБГД}}$  (рис. 6). Так як в ході експериментів різниця температур в кімнаті та на подвір'ї змінювалась, зручно виражати коефіцієнт регенерації тепла в залежності від безрозмірного перепаду температур (залежність 2), а коефіцієнт регенерації вологи – від безрозмірного перепаду абсолютної вологості повітря (рис. 7), ( залежність 3):

$$\Delta T_B = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}}; \quad (2)$$

$$\Delta d_B = \frac{\Delta d}{\Delta d_{\max}}, \quad (3)$$

де  $\Delta T$  – перепад температур;  $\Delta d$  – перепад абсолютної вологості повітря;  $\Delta T_{\max}$  – максимальний перепад температур;  $\Delta d_{\max}$  – максимальний перепад абсолютної вологості повітря.

Шляхом апроксимації залежності коефіцієнтів регенерації тепла і вологи від безрозмірних перепадів температури та абсолютної вологості, встановлено що всі експериментальні дані з коефіцієнтів регенерації тепла та вологи, для коефіцієнта  $K_T$  в діапазоні  $0 \leq \Delta T_A \leq 0,35$ , а для  $K_B - 0 \leq \Delta d_B \leq 0,8$ , можливо з достатньою для інженерних розрахунків точністю описати лінійним багаточленом другого ступеня:

$$K_T = 1 - 0,31\Delta T_B - 0,13\Delta T_B^2 \quad (4)$$

$$K_B = 1 - 0,31\Delta d_A - 0,13\Delta d_A^2, \quad (5)$$

Те, що залежності  $K_T(\Delta T_B)$  та  $K_B(\Delta d_B)$  описуються рівняннями з одними й тими ж чисельними коефіцієнтами може вказувати на те, що існує тісний зв'язок між процесами тепло- та масоперенесення. Разом з тим значення цих коефіцієнтів, напевне залежать від конструкції регенератора та природи і кількості адсорбенту.

Експериментально встановлено, що зростання дисперсності сорбента істотно підвищити час перемикавання потоків. Але, це призводить до істотного зростання гідродинамічного опору шару насадки DP (рис. 7). Це тягне за собою зростання витрат електроенергії на прокачування повітря через насадки:

$$W = \frac{V \cdot \Delta P}{\eta}, \quad (6)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії вентилятора.

Приймаючи  $\eta=0,7$  маємо, що при  $V=30$  м<sup>3</sup>/год та  $\Delta P=500$  Па, на прокачування повітря через насадки витрачається 6 Вт.

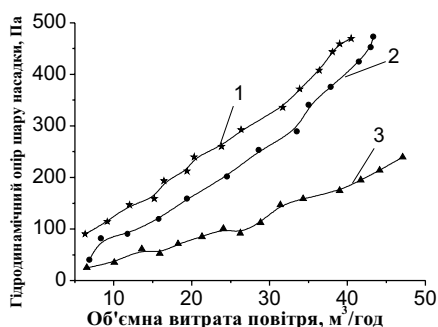


Рис. 7. Гідродинамічний опір шару насадки в залежності від об'ємної витрати повітря:

- 1 – в якості теплоакмулювального матеріалу використано скляні шари діаметром 2 мм;
- 2 – в якості теплоакмулювального матеріалу використано композитний сорбент «силікагель–Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>» гранули 2,0–2,5 мм;
- 3 – в якості теплоакмулювального матеріалу використано композитний сорбент «силікагель–Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>» гранули 3,0–3,5 мм

Таким чином, запропонований матеріал може бути використаний в якості буфера вологи в житлових і складських приміщеннях, але й для підігрівання приточного повітря, що дозволить істотно скоротити енергозатрати в вентиляційних системах.

Таким чином, натурні випробування описаного сорбційного регенератора тепла, здійснені при низькій температурі навколишнього сере-

довища, показали, що даний пристрій допомагає підтримувати температуру в приміщенні на рівні 20–22° С, а відносну вологість – 50–60%. Крім цього коефіцієнти регенерації тепла і вологи можливо цілеспрямовано змінювати в досить широких діапазонах змінюючи час напівциклу, розмір гранул сорбенту та його кількість. Гідравлічний опір шару насадки з композитного сорбенту «силікагель–Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>» складає при використанні при зміні витрати повітря в діапазоні 5–47 м<sup>3</sup>/год зростає від 3 до 200–500 Па в залежності від діаметра гранул сорбента.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гордеева Л.Г. Композитные материалы «соль в пористой матрице»: дизайн адсорбентов с заданными свойствами: дис...докт. хим. наук: 02.00.04. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук. – Новосибирск, 2013 – 347 с.
2. Доценко С.А. Энергосберегающие технологии систем вентиляции и кондиционирования воздуха // Строй-профиль. – 2003. – № 4. – С.54–56.
3. Structure and Adsorption Properties of the Composites 'Silica Gel – Sodium Sulphate', obtained by Sol – Gel Method / Sukhyy Kostyantyn M., Belyanovskaya Elena A., Kozlov Yaroslav N., Kolomiyets Elena V., Sukhyy Mikhaylo P. // Applied Thermal Engineering. – 2014. – № 64. – С.408–412.
4. Аристов Ю.И., Мезенцев И.В., Мухин В.А. Новый подход к регенерации теплоты и влаги в системе вентиляции помещения. II. Прототип реального устройства // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т.79. – № 3. – С.1–7.

Надійшла до редакції 14.10.2016

## TECHNOLOGY OF THE REGENERATION OF LOW-POTENTIAL HEAT AND MOISTURE BY MEANS OF THE COMPOSITE SORBENT «SILICA GEL–SODIUM SULFATE»

*E.V. Kolomiyets, K.M. Sukhyy, E.A. Belyanovskaya, V.I. Tomilo, M.P. Sukhyy*

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

The design of a sorption heat regenerator for ventilation systems is shown; its operation and the results of the full-scale tests are described. The technology of the regeneration of low-potential heat and moisture by composite sorbent «silica gel–sodium sulfate» has been suggested. The synthesis of the composite sorbent «silica gel–sodium sulfate» is presented. The experimental plots of the changes in temperature, absolute and relative humidity at the inlet and outlet of the apparatus and between fillings with the composite are given in the paper. The correlation between flows switch-over time, airflow rate and temperature drop has been established. The relationship between heat recovery coefficient and dimensionless temperature drop as well as the relationship between moisture regeneration coefficient and dimensionless absolute humidity drop has been derived with sufficient accuracy for engineering calculation. The ability of

*purposeful modification of the above-mentioned ratios within broad ranges by changing the half-cycle time, the size of the granules of the adsorbent and its amount is revealed. The results of the study can be used in the development of energy-saving ventilation systems for residential and storage premises.*

**Keywords:** composite sorbent; low-potential heat; sorption heat regenerator; moisture recovery coefficient; heat recovery coefficient.

#### REFERENCES

1. Gordeeva L.G., *Kompozitnye materialy «sol' v poristoi matritse»: dizain adsorbentov s zadanyimi svoistvami* [The composites «salt in porous matrix»: design of adsorbents with desired properties]: thesis for the degree of Doctor of Chemical Sciences, Boreskov Novosibirsk Institute of Catalysis, 2013. (*in Russian*).
2. Dotsenko S.A. Energoberegayschie tekhnologii sistem ventilyatsiy i konditsionirovaniya vozdukha [Energy saving technology of ventilation and air-conditioning]. *Stroyprofil*, 2003, vol. 4, pp. 54-56. (*in Russian*).
3. Sukhyy K.M., Belyanovskaya E.A., Kozlov Y.N., Kolomyets E.V., Sukhyy M.P. Structure and adsorption properties of the composites “silica gel–sodium sulphate», obtained by sol–gel method. *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 64, pp. 408-412.
4. Aristov I.I., Mezentsev I.V., Myhin V.A. Novyi podkhod k regeneratsii teploty i vlagi v sisteme ventilyatsii pomescheniya. II. Prototip real'nogo ustroystva [A new approach to regenerating heat and moisture in the ventilation system of the room. II. The prototype of a real device]. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 2006, vol. 79, no. 3, pp. 1-7. (*in Russian*).