

УДК 662.995

*Сухий К.М.^а, Коломієць О.В.^а, Прокопенко О.М.^б, Гаврилко А.В.^а, Беляновська О.А.^а***АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ОБ'ЄМУ АДСОРБЦІЙНОГО ТЕПЛООВОГО АКУМУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ОПАЛЮВАННЯ**^а ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна^б Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна

Робота присвячена розробці ефективного алгоритму для розрахунку обсягу адсорбційного пристрою для акумулювання теплової енергії для децентралізованої системи опалення в приватному будинку. Пропонується наступна методика розрахунку: обчислення теплового навантаження для опалення, що включає розрахунок теплових втрат через зовнішні огорожі, і шляхом інфільтрації, а також внутрішніх тепловиділень, розрахунок максимальної адсорбції, теплоти адсорбції, визначення маси і об'єму адсорбенту. Максимальне значення адсорбції запропоновано розраховувати за характеристиками сорбенту або при відсутності даних для композитного адсорбенту як лінійну суперпозицію для механічної суміші. Масу адсорбенту запропоновано обчислювати як відношення теплового навантаження на опалення та теплоти адсорбції, а обсяг адсорбенту – маси та густини адсорбенту. Оцінювальний розрахунок теплового навантаження для приватного будинку був виконаний згідно запропонованого алгоритму, а оптимальний склад композитів «силікагель–натрій сульфат» і «силікагель–натрій ацетат» визначався відповідно до мінімального обсягу теплоакуючого матеріалу. Як найнижчі значення об'ємів, так і максимальна ефективність композитних адсорбентів з масовим співвідношенням силікагеля і Na_2SO_4 або CH_3COONa 20:80 пояснюються максимальним значенням теплоти адсорбції. Оптимальні конструктивні і експлуатаційні характеристики адсорбційного теплового акумулятора були визначені за допомогою запропонованого алгоритму. Передбачається, що відносна вологість пароповітряного потоку становить 50–60%. Беручи до уваги оптимальні значення швидкості пароповітряного потоку $w < 0,6$ м/с, рекомендується застосовувати висоту адсорбуючого шару в діапазоні від 0,25 до 0,5 м.

Ключові слова: адсорбційний акумулятор теплової енергії, теплове навантаження на опалення, теплота адсорбції, композитний сорбент.

Постановка проблеми

Масштаби споживання палива на теплопостачання житлових приміщень в Україні досить великі. Так, витрата теплоти на опалення об'єктів однакової площі в Україні близько в 2–3 рази вище, ніж в Західній Європі [1]. Це є наслідком не лише низьких коефіцієнтів корисної дії котелень, але й загального зношування діючих теплових мереж. В цих умовах стають актуальними більш широко впровадження децентралізованих систем теплопостачання для споживачів, які розташовані на великих відстанях від ТЕС та котелень. При цьому їх експлуатація згідно з рекомендаціями конференції з клімату в Парижі в 2015 році (COP21) не повинно призводити до

зростання викидів парникових газів, а отже передбачає використання нетрадиційних джерел теплової енергії. Використання акумуляторів теплової енергії дозволяє істотно підвищити ефективність використання відновлюваних джерел теплопостачання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Адсорбенти десятиріччями розглядалися як перспективні для поглинання, акумулювання та трансформації теплової енергії [2]. Найбільш розповсюдженими в сучасних системах теплопостачання є теплоакуючі модулі на основі ємнісних матеріалів. В той же час пристрої на основі подібних середовищ істотно обмежені за температурним інтервалом роботи та густиною

запасання енергії. Більш перспективними є фазово-перехідні теплові акумулятори. Широкому впровадженню стоїть на заваді висока корозійна активність застосовуваних матеріалів та жорсткі вимоги до джерела теплової енергії при регенерації. Найбільш перспективними та екологічно безпечними є адсорбційні теплові акумулятори, які суміщують акумулювання теплової енергії на основі оборотних процесів адсорбції – десорбції з ємнісним та фазово-перехідним механізмом.

Адсорбційні системи опалення на основі робочих пар «силікагель–вода» або «цеоліт13X–вода» розробляли в Австрії та Германії [3,4].

Водночас алгоритми розрахунків систем тепlopостачання з тепловими акумуляторами переважно базуються на ємнісних пристроях [5]. Тому задача розробки алгоритму розрахунку адсорбційних теплоакумуляюючих пристроїв набуває першочергового значення.

Формулювання мети дослідження

Хай відомі зовнішній об'єм будівлі, площа опалюваних приміщень та матеріал зовнішніх огорожень, а також схема системи децентралізованого опалення. Тоді, теплове навантаження опалення Q'_o , Вт вочевидь розраховується, як [6]:

$$Q'_o = Q'_t + Q'_n - Q'_{тв}, \quad (1)$$

де Q'_t – теплові втрати через зовнішні огороження, Вт, Q'_n – теплові втрати внаслідок інфільтрації, Вт, $Q'_{тв}$ – внутрішні тепловиділення, Вт.

Необхідно визначити масу адсорбенту, яка відповідає тепловому навантаженню на опалення. Для досягнення цієї мети слід визначити теплоту адсорбції

$$\Delta H_{\text{адс}} = \Delta h \cdot a \cdot \frac{1000}{M}, \quad (2)$$

де Δh – теплота адсорбції речовини (вода), яка сорбується, кДж/моль, a – гранична адсорбція, г/г, M – молярна маса адсорбованої речовини, г/моль.

Граничну адсорбцію можна визначати за характеристиками сорбенту, або при відсутності даних для композитного адсорбенту, як лінійну суперпозицію для механічної суміші:

$$a = \sum_{i=1}^N a_i \cdot x_i, \quad (3)$$

де a_i – гранична адсорбція i -го компонента, x_i – його масова доля в адсорбенті.

Тоді масу адсорбенту визначають за відношенням:

$$M = \frac{Q'_o}{\Delta H_{\text{адс}}}, \quad (4)$$

а об'єм, m^3 згідно з:

$$V = \frac{M}{\rho}, \quad (5)$$

де ρ – густина адсорбенту, $кг/м^3$.

Таким чином, запропонований алгоритм передбачає теплове навантаження на опалення, яке включає розрахунок теплових втрат через зовнішні огороження та внаслідок інфільтрації внутрішніх тепловиділень, граничної адсорбції, теплоти адсорбції, визначення маси адсорбенту та об'єму адсорбенту (рис. 1).

Мета дослідження – визначення оптимального складу сорбенту, який відповідає тепловому навантаженню на опалення при мінімальних габаритних розмірах теплоакумуляюючого пристрою.

Викладення основного матеріалу дослідження

Схема децентралізованої системи опалення наведена на рис. 2. Для даних умов пропонується використовувати систему опалення зі штучною циркуляцією. Основним ключовим моментом такої систем є циркуляційний насос. Під його впливом теплоносій йде до батарей, а потім до нагрівального приладу. При монтажі

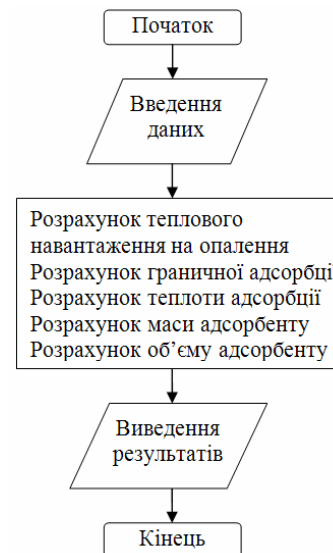


Рис. 1. Блок-схема алгоритму розрахунку маси сорбенту та об'єму адсорбційного теплоакумуляюючого пристрою

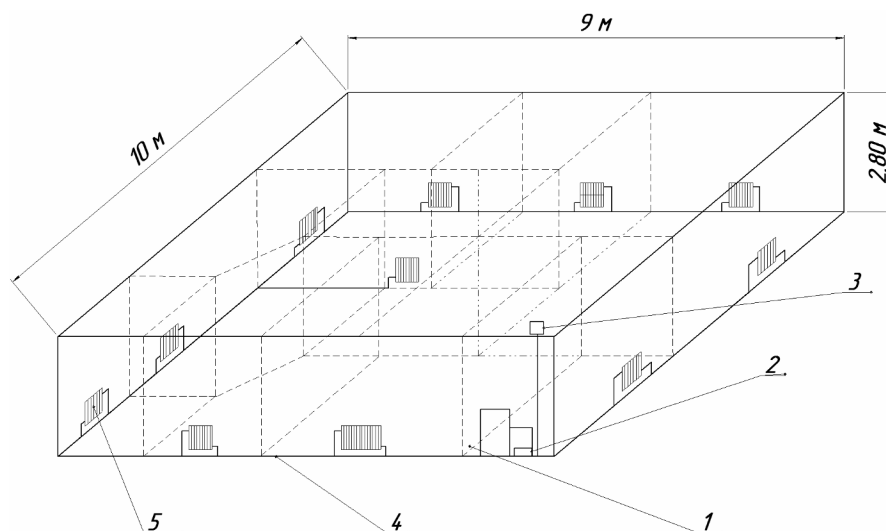


Рис. 2. Схема децентралізованої системи опалення приватного будинку: 1 – тепловий акумулятор; 2 – насос; 3 – розширювальний бак; 4 – поліпропіленові труби; 5 – алюмінієва батарея

такої системи немає необхідності в постійному ухилі труб. Зовнішній об'єм будинку пропонується прийняти $289,8 \text{ м}^3$. Коефіцієнт скління (відношення поверхні вікон до загальної поверхні вертикальних зовнішніх огорожень) $\varphi=0,25$. Коефіцієнти теплопередачі стін, вікон, стелі та підлоги: $k_{\text{ст}}=0,49 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$; $k_{\text{ок}}=1,48 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$; $k_{\text{пт}}=0,31 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$; $k_{\text{пл}}=0,42 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$.

Коефіцієнти зниження розрахункової різниці температур для стін, вікон, стелі та підлоги: $\Psi_{\text{т}}=\Psi_{\text{ок}}=1$; $\Psi_{\text{пт}}=0,8$; $\Psi_{\text{пл}}=0,6$. Температура внутрішнього повітря $t_{\text{в.р.}}=18^\circ\text{C}$, а розрахункова для опалення температура зовнішнього повітря $t_{\text{н.о.}}=-23^\circ\text{C}$. Об'ємний коефіцієнти будівлі прийнято $K_{\text{об}}=5 \text{ м}^3/\text{м}^2$, а питомі тепловиділення (на 1 м^2 житлової площі) – $q_{\text{т.в.}}=20 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Оціночний розрахунок тепловтрат через огорожувальні конструкції та теплове навантаження на опалення розраховані згідно з [6,7]. Теплове навантаження на опалення $3929,3 \text{ Вт}$, що відповідає близько $339,5 \text{ МДж}$ за добу.

В якості адсорбенту запропоновано використовувати композит «силікагель–натрій сульфат» або «силікагель–натрій ацетат». Результати розрахунку теплоти адсорбції і маси сорбен-

ту при тепловому навантаженні на опалення $339,5 \text{ МДж}/\text{добу}$ і масовому співвідношенню силікагелю та Na_2SO_4 або CH_3COONa 20:80, 40:60, 60:40 та 80:20, які представлено в табл. 1 та 2. Вочевидь, зі зростанням вмісту натрій сульфату об'єм шару адсорбенту має зменшуватись. Найбільш ефективним є вочевидь композитний адсорбент з масовим співвідношенням силікагелю та Na_2SO_4 або CH_3COONa 20:80. Крім того, маса та об'єм шару адсорбенту визначаються теплотою адсорбції.

Таблиця 1
Результати розрахунку теплоти адсорбції і маси сорбенту «силікагель– Na_2SO_4 » при тепловому навантаженні на опалення $339,5 \text{ МДж}/\text{добу}$

Вміст силікагелю, %	Вміст Na_2SO_4 , %	Величина адсорбції, а, кг/кг	$\Delta H_{\text{адс}}$, кДж/кг	М, кг	V , м^3
20	80	1,046	3486,67	97,368	0,135
40	60	0,822	2740,00	123,9	0,172
60	40	0,598	1993,33	170,31	0,237
80	20	0,374	1246,70	272,31	0,378

Більш високі значення теплоти адсорбції і,

Таблиця 2

Теплота адсорбції і маса сорбенту «силікагель– CH_3COONa » при тепловому навантаженні на опалення $339,5 \text{ МДж}/\text{добу}$

Вміст силікагелю, %	Вміст CH_3COONa , %	Величина адсорбції, а, кг/кг	$\Delta H_{\text{адс}}$, кДж/кг	М, кг	V , м^3
20	80	0,557	1856,10	182,91	0,277
40	60	0,455	1517,07	223,79	0,339
60	40	0,353	1178,05	288,19	0,437
80	20	0,252	839,02	404,64	0,613

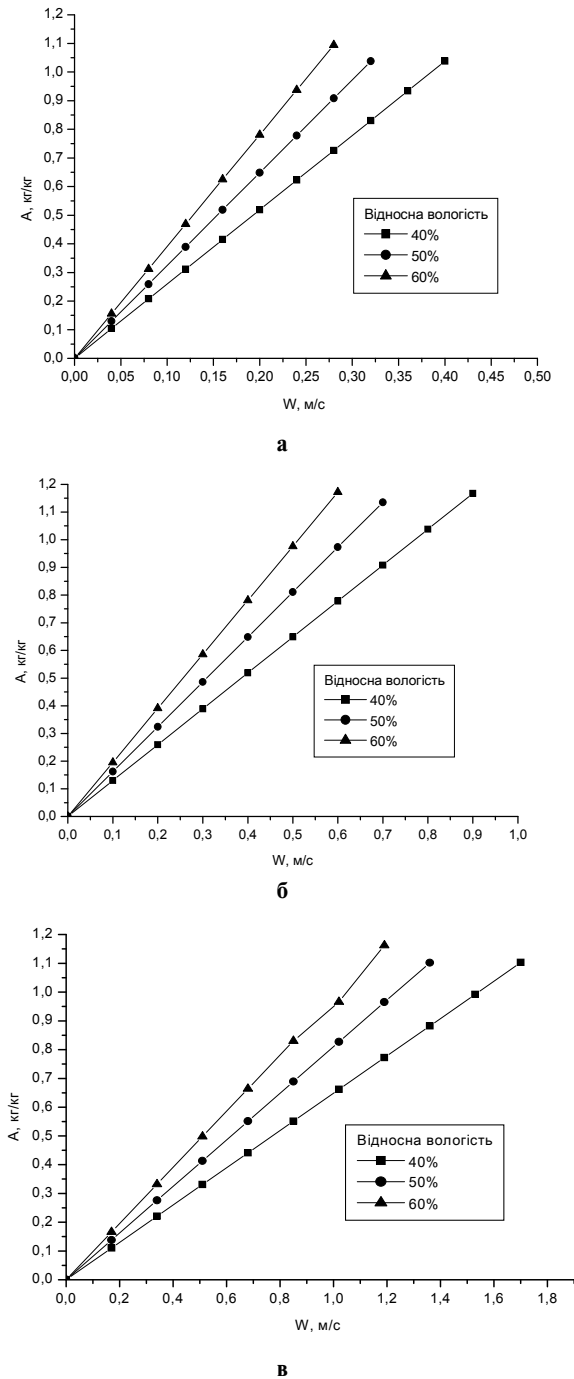


Рис. 3. Залежність величини сорбції від швидкості пароговзного потоку та висоти шару композиту та відносній вологості повітря: а – $H=0,25$ м; б – $H=0,5$ м; в – $H=1$ м

отже, менші маси та об'єми сорбентів встановлені для композиту «силікагель–натрій сульфат», який є більш ефективним в порівнянні з композитом «силікагель–натрій ацетат». В той же час температура регенерації композиту «силікагель–натрій сульфат» дорівнює 90°C , а «силікагель–натрій ацетат» 60°C .

Крім того, доцільно оцінити вплив конструктивних характеристик теплоакumuлюючого пристрою, зокрема, висоти шару адсорбенту, на величину адсорбції. Розрахунок був виконаний за допомогою алгоритму, запропонованого в [8].

В результаті моделювання була визначена залежність величини адсорбції від швидкості пароповітряного потоку при температурі 60°C при відносній вологості повітря 40, 50 та 60% (рис. 3).

Максимальні значення адсорбції протягом 8 год спостерігаються при відносній вологості 60% та швидкостях пароповітряного потоку $w=0,2-0,35$ м/с (висота шару композиту $H=0,25$ м), $0,6-0,85$ м/с ($H=0,5$ м) та $1,1-1,7$ м/с ($H=1,0$ м). Таким чином, оскільки доцільно використовувати $w < 0,6$ м/с, можна рекомендувати висоту шару композиту $0,25-0,5$ м.

Висновки

Запропоновано алгоритм розрахунку маси та об'єму адсорбенту для теплового акумулятора в системах децентралізованого опалення. Запропонований алгоритм дозволяє визначити оптимальний склад адсорбенту для використання в теплоакumuлюючих пристроях систем опалення в приватних будинках.

Робота виконана за підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень (номер державної реєстрації 0116U001489).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Єнін П.М., Швачко Н.А. Теплопостачання: Навч. посіб. – Ч. 1. Теплові мережі та споруди. – К.: Кондор, 2007. – 244 с.
2. Yu N., Wang R.Z., Wang L.W. Sorption thermal storage for solar energy // Progress in Energy and Combustion Science. – 2013. – Vol. 39. – pp. 489-514.
3. Hauer A. Adsorption systems for TES/design and demonstration projects // Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption. – 2007. – pp. 409-427.
4. Hauer A. Thermal energy storage with zeolite for heating and cooling applications // Proceedings of 3rd workshop of annex 17 ECES IA/IEA. – 2002. – № 3. – pp.234-239.
5. Ганжа И.Г., Хищенко А.Г. Тепловое аккумулярование как способ повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения // Энергосбережение – Энергетика – Энергоаудит. – 2012. – № 3 (97). – С.16-21.
6. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
7. Сафонов А.П. Сборник задач по теплофикации и тепловым сетям: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.

8. Operating processes parameters of open-type heat storage devices in heat supply systems / E.A. Belyanovskaya, K.M. Sukhyy, O.V. Kolomiyets, M.P. Sukhyy // Наукові праці ОНАХТ. – 2017. – Т. 81, вип. 1. – С.4-9.

Надійшла до редакції 31.10.2017

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОБЪЕМА АДсорбЦИОННОГО ТЕПЛООВОГО АКУМУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ОТОПЛЕНИЯ

Сухой К.М., Коломиец Е.В., Прокопенко Е.М., Гаврилко А.В., Беляновская Е.А.

Работа посвящена разработке эффективного алгоритма для расчета объема адсорбционного устройства для аккумуляции тепловой энергии для децентрализованной системы отопления в частном доме. Предлагается следующая методика расчета: вычисление тепловой нагрузки для отопления, включающей расчет тепловых потерь через внешние ограждения, и путем инфильтрации, а также внутренних тепловыделений, расчет максимальной адсорбции, теплоты адсорбции, определение массы и объема адсорбента. Максимальное значение адсорбции предложено рассчитывать по характеристикам сорбента или при отсутствии данных для композитного адсорбента как линейную суперпозицию для механической смеси. Массу адсорбента предложено вычислять как отношение тепловой нагрузки на отопление и теплоты адсорбции, а объем адсорбента – как частное массы и плотности адсорбента. Оценочный расчет тепловой нагрузки для частного дома был выполнен по предлагаемому алгоритму, а оптимальный состав композитов «силикагель–сульфат натрия» и «силикагель–ацетат натрия» определялся в соответствии с минимальным объемом теплоаккумулирующего материала. Как самые низкие значения объемов, так и максимальная эффективность композитных адсорбентов с массовым соотношением силикагеля и Na_2SO_4 или CH_3COONa 20: 80 объясняются максимумом значения теплоты адсорбции. Оптимальные конструктивные и эксплуатационные характеристики адсорбционного теплового аккумулятора были определены с помощью предложенного алгоритма. Предполагается, что относительная влажность паровоздушного потока составляет 50–60%. Принимая во внимание оптимальные значения скорости паровоздушного потока $w < 0,6$ м/с, рекомендуется применять высоту адсорбирующего слоя в диапазоне от 0,25 до 0,5 м.

Ключевые слова: адсорбционный аккумулятор тепловой энергии, тепловая нагрузка на отопление, композитный сорбент, теплота адсорбции, конструктивные характеристики композитный сорбент.

CALCULATION ALGORITHM OF VOLUME OF ADSORPTIVE HEAT STORAGE DEVICE FOR DECENTRALIZED SPACE HEATING SYSTEM

Sukhyy K.M.^a, Kolomiyets E.V.^a, Prokopenko O.M.^b, Gavrilko A.V.^a, Belyanovskaya E.A.^a

^a Ukrainian State University of Chemical Engineering, Dnipro, Ukraine

^b State Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

The work is devoted to the development of an efficient algorithm for calculating the volume of the adsorptive thermal energy storage device for a decentralized heating system in a private house. The following computation procedure is proposed to include: calculation of thermal load for heating involving the determination of thermal losses through external fences, thermal losses due to infiltration and internal heat dissipation, the reckoning of maximal adsorption, adsorption heat, determination of adsorbent mass and adsorbent volume. The maximal adsorption value is suggested to be calculated by the characteristics of the sorbent, or in the absence of data for a composite adsorbent, as a linear superposition for a mechanical mixture. The adsorbent mass is estimated as a ratio of a thermal load for heating and adsorption heat. The adsorbent volume is calculated as quotient of mass and density of adsorbent. An evaluative calculation of the heat load for a private house was carried out by the proposed algorithm, and the optimal composition of the composite adsorbents 'silica gel–sodium sulfate' and 'silica gel–sodium acetate' being determined according to the minimal volume of the layer of heat storage material. Both the lowest volume values and the highest efficiency of a composite adsorbents with a mass ratio of silica gel and Na_2SO_4 or CH_3COONa 20: 80 are explained by the maximum value of adsorption heat. Optimal construction and operating characteristics of adsorptive heat storage device were determined by the proposed algorithm. The relative degree of humidity of vapor-air flow is suggested to be 50–60%. Having taken into account optimal values of vapor-air flow rate $w < 0.6$ m/s, it is advisable to apply heights of adsorbent layer in the range from 0.25 m to 0.5 m.

Keywords: adsorptive heat storage device, heat load, composite sorbent, heat of adsorption, construction characteristics.

REFERENCES

1. Yenin P.M., Shvachko N.A. *Teplopostachannya (Chastina I. Teplovi meregi ta sporudy)* [Heat supply (Part I. Heat networks and constructions)]. Kondor, Kiev, 2007. 244 p. (in Ukraine).
2. Yu N., Wang R.Z., Wang L.W. Sorption thermal storage for solar energy. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, vol. 39, pp. 489-514.
3. Hauer A. Adsorption systems for TES/design and demonstration projects. *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption*, 2007, pp. 409-427.
4. Hauer A. Thermal energy storage with zeolite for heating and cooling applications. *Proceedings of 3rd workshop of annex 17 ECES IA/IEA*, 2002, № 3, pp. 234-239.
5. Ganga I.G., Khiminko A.G. *Teplovoe akumulirovanie kak sposob povysheniya energeticheskoy effektivnosti system teplo-snabgeniya* [Heat storage as a method of enhancing of energy efficiency of heat supply system]. *Energoberegenie – Energetika – Energoaudit*, 2012, № 03 (97), pp. 16-21. (in Russian).
6. Sokolov E.Ya. *Tepoficatsiya i teplovi seti* [District heating and heat networks]. Moscow, MEI, 2001. 472 p. (in Russian).
7. Safonov A.P. *Sbornik zadach po teploficatsii I teplovim setyam* [Book of tasks for district heating and heat networks]. Moscow, Energoatomizdat, 1985. 232 p. (in Russian).
8. Belyanovskaya E.A., Sukhyy K.M., Kolomiyets O.V., Sukhyy M.P. Operating processes parameters of open-type heat storage devices in heat supply systems. *Scientific works of Odessa National Academy of Food Technology*, 2017, vol. 81, № 1, pp. 4-9.