

УДК 628.336.3

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ ПІД ЧАС СУШІННЯ КОМПОЗИТНИХ ГРАНУЛ

Петрова Ж.О.¹, член-кореспондент НАН України, д.т.н., Давиденко Б.В.², д.т.н.,
Новікова Ю.П.³, докт. філос.

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, професор, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, старший науковий співробітник, e-mail: bdavydenko@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-8738-7612>

³Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, yuliiyanovikova3@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2024.3>

У статті експериментальні дослідження кінетики сушіння композитних гранул на основі застарілих мулових відкладень та торфу. Які показали, що при збільшенні температури теплоносія тривалість сушіння зменшується у 1,4 рази. Проведено чисельне моделювання тепломасоперееносу в процесі сушіння гранул. Виконане чисельне моделювання конвективного сушіння композитних гранул підтвердило, що дана модель у цілому задовільно описує характер зміни у часі температури в центрі гранули і її вологості в процесі конвекційного сушіння. У цілому ж можна відзначити, що розглянута модель може застосовуватися для наближеної попередньої оцінки часу сушіння гранули, що виготовлена на шнековому механічному пристрої у пропорції 50% мулу та 50% торфу.

The paper deals with experimental studies of the drying kinetics of composite pellets based on old silt and peat. They showed that with an increase in the temperature of the coolant, the drying time decreases by 1.4 times. Numerical modeling of heat and mass transfer in the process of drying pellets was carried out. Numerical simulations of convective drying of composite pellets have shown that this model generally satisfactorily describes the nature of the change in the temperature in the center of the pellet and its moisture content during convective drying. In general, it can be noted that the considered model can be used for an approximate preliminary assessment of the drying time of a pellet made on a screw mechanical device in the proportion of 50% silt and 50% peat.

Бібл. 8, рис. 9.

Ключові слова: торф, застарілі мулові відкладення, сушіння.

W – вологість, %;

τ – час, хв;

V – швидкість теплоносія, м/с;

h – висота шару, мм;

d – діаметр гранул, мм;

r_0 – зовнішній радіус гранули, мм;

r_s – радіальна координата поверхні випаровування рідини;

$\Delta\varphi$ – кут розкриття;

ε – пористість;

j – густина потоку, кг/(м²с) ;

Y_s – відносна вагова концентрація водяної біля поверхні випаровування.

Вступ

Постановка проблеми. Сьогодні у світі одним із основним питанням є поліпшення екології довкілля. При цьому в зв'язку продовольчою проблемою та війною, яка призвела до замінування та забруднення, потрібно максимально вивільняти земельні площі та проводити їх рекультивацію, які були під технічним використанням, для сільськогосподарських угідь.

В Україні існує проблема переповнених мулових майданчиків з «застарілими» муловими відкладами, які майже позбулися органічної складової. У Львові мулові майданчики займають площу 22 га, на якій накопичено понад 1,6 млн тонн осадів та сьогоднішній день переповнені [1]. Також Бортинська станція в Києві з муловими майданчиками площа яких становить 272 га і несуть велику небезпеку, тому що фактично

вони переповнені втричі — замість 3,5 передбачених, містять 10 млн тонн мулової маси [2, 3].

Переробка цих застарілих мулових відкладень є можливістю вирішення поставлених завдань [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До джерел альтернативного палива можна віднести торф, біомасу, шлаки та відходи промисловості, сільського господарства, комунально-побутових та інших підприємств [4].

В роботі [2] представлено технології переробки мулових відкладень, з яких видно, що більшість націлена на переробку активного мулу. А так як застарілі мулові відкладення майже втратили більшу частину органічної складової, одним із способів їх переробки є створення композитної сировини на їх основі та спалювання.

Тому актуальним є переробка застарілих мулових відкладень сушінням, для створення гранульованого палива.

Метою роботи є експериментальний та теоретичний аналіз кінетики сушіння композитних гранул на основі застарілих мулових відкладень та торфу.

Матеріали та методи досліджень

Для створення композиту використовували застарілі мулові відкладення очисних споруд (м. Фастів) та фрезерного торфу з родовища ДП «Чернігівторф» у співвідношенні 50% на 50%.

Для створення товарного виду палива для різних котлів було проведено гранулювання на шнековому механічному пристрої, який призначений для формування партій гранул.

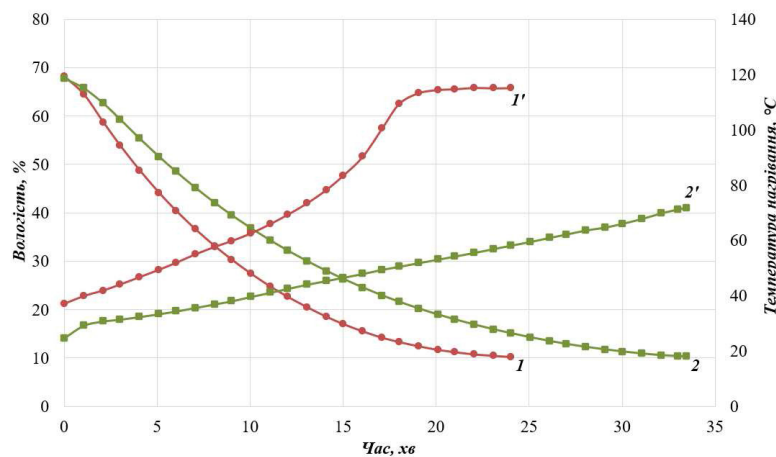


Рис. 1. Зміна вологості (1,2) і температури всередині гранул (1',2') мулоторф'яних гранул у пропорції 50% мулу/50% торфу від часу. Режимні параметри $V = 2$ м/с, $d = 6$ мм: 1,1' – 120°C ; 2,2' – 80°C

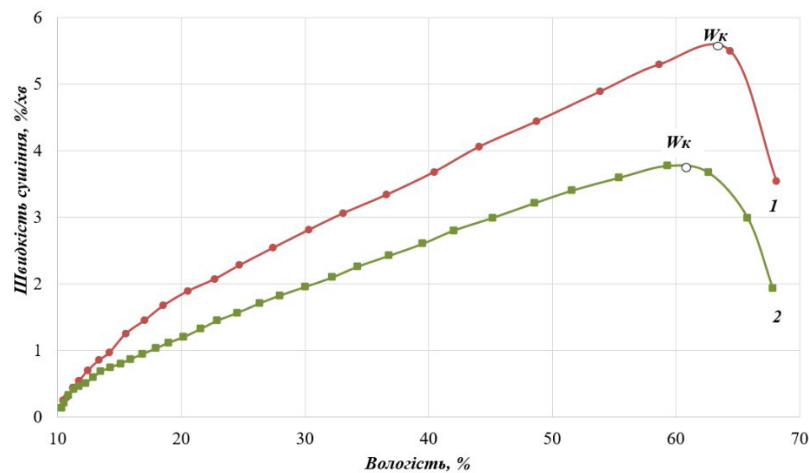


Рис. 2. Зміна швидкості сушіння мулоторф'яних гранул у пропорції 50% мулу/50% торфу. Режимні параметри $V = 2$ м/с, $d = 6$ мм: 1 – 120°C ; 2 – 80°C

Дослідження кінетики сушіння проводили на експериментальному конвективному стенді з автоматичним збором інформації [17]. Експеримент при заданому температурному режимі повторюють мінімум 3 рази, якщо данні експерименту співпадають то переходять на інший режим.

На рис. 3.19 представлені температурні криві та кінетика сушіння мулоторф'яних гранул на конвективному сушильному стенді при температурах 80°C та 120°C у пропорції 50% мулу/50% торфу.

Чисельне моделювання процесу тепломасопереносу в процесі сушіння композитних гранул. Для розробки розрахункової моделі сушіння циліндричних гранул з пористого матеріалу застосовується наближена теплофізична модель заглиблення зони випаровування. В основу цієї моделі покладено припущення, що випаровування вологи протікає не в усьому об'ємі пористої циліндричної частинки, а лише на деякій поверхні, яка в процесі сушіння рухається від поверхні циліндричного тіла до її центру. Вище цієї поверхні (суха зона) знаходиться пароповітряна суміш, а нижче цієї поверхні (волога зона) - вода.

Дана модель, що застосовувалася в роботі [6], достатньо задовільно описує процес сушіння гранул циліндричної форми малих розмірів. Результати розрахунків за цією моделлю задовільно узгоджується з результатами експериментів.

Модель передбачає, що фрагмент капілярно - пористого матеріалу циліндричної форми можна схематично представити у вигляді системи, що складається з твердого скелету (1), рідини (2) та пароповітряної суміші (3) (рис.3).

На рис.3 представлено розрахунковий елемент, що має вигляд сектору циліндричного тіла з кутом розкриття $\Delta\varphi$. Якщо матеріал має пористість ε , то сек-

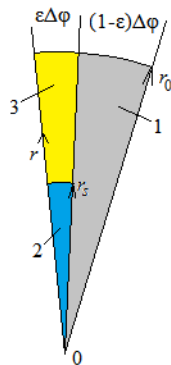


Рис. 3. Розрахунковий елемент циліндричного пористого матеріалу

тор з кутом розкриття $\varepsilon\Delta\varphi$ відноситься до елементів рідини (2) та пароповітряної суміші (3), а сектор з кутом $(1-\varepsilon)\Delta\varphi$ - до твердого скелета (1). Вважається, що кут $\Delta\varphi$ - достатньо малий і що наведений на рис.1 елемент періодично повторюється в напрямку кутової координати φ . Вважається також, що в кожному елементі $\Delta\varphi$ теплофізичні процеси протікають однаково. Тому дану задачу тепломасоперенесення в циліндричній гранулі можна розглядати, як одновимірну. Тобто, величини, що характеризують температурно - вологісний стан гранули вважаються залежними лише від поточного радіусу гранули r та часу τ (рис. 3).

Перенесення маси пари в області (3), що містить парогазову суміш, відбувається дифузійно та за рахунок фільтраційного руху суміші, що виникає внаслідок градієнта повного тиску газу в пористому середовищі. Але внаслідок малих розмірів гранул цим градієнтом тиску можна знехтувати і вважати, що тиск в газовій суміші такий самий, як і у зовнішньому повітрі. Тому фільтраційним рухом газу також можна знехтувати. Швидкість Стефана також вважається надто малою, щоб впливати на процес перенесення маси. Отже вважається, що перенесення пари в пористому середовищі відбувається тільки дифузійно. Дифузійний потік маси пари в пароповітряній суміші описується законом Фіка

$$j = -\rho_g \frac{D}{\zeta} \text{grad}(Y), \quad (1)$$

де $Y = \frac{\rho_v}{\rho_g} = \frac{\rho_v}{\rho_v + \rho_a}$, кг/кг - відносна масова концентрація водяної пари в повітрі; D , м²/с - коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі; ρ_v ; ρ_a , кг/м³ - парціальні густини водяної пари та сухого повітря відповідно; $\rho_g = \rho_v + \rho_a$, кг/м³ - густина поро-повітряної суміші; ζ - коефіцієнт опору дифузії парів води в пористому матеріалі.

Складене на основі закону Фіка (1) рівняння перенесення дифузійно маси водяної пари в пароповітряній суміші має в полярних координатах вигляд:

$$\rho_g \frac{\partial Y}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho_g \frac{D}{\zeta} r \frac{\partial Y}{\partial r} \right), \quad (2)$$

де r , м - радіальна координата; τ , с - час.

Рівняння (2) описує дифузійно масу водяної пари в області (3), де радіус r змінюється у межах $r_s \leq r \leq r_0$; r_s - радіальна координата поверхні випаровування рідини; r_0 - зовнішній радіус гранули. Граничними умовами для рівняння будуть:

$$\text{при } r = r_0: -\rho_g \frac{D}{\zeta} \frac{\partial Y}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \beta(Y(r_0) - Y_T), \quad (3)$$

$$\text{при } r = r_s: Y = Y_s(T_s, W), \quad (4)$$

де β , кг/(м²с) - коефіцієнт масовіддачі; Y_T - відносна вагова концентрація водяної пари в теплоносії; $Y_s(W, T_s)$ - відносна вагова концентрація водяної пари на поверхні випаровування, яка залежить від температури поверхні випаровування T_s та вологості гранули W .

Якщо сума парціальних тисків водяної пари і сухого повітря - постійна і дорівнює тиску атмосферного повітря p_0 , величину Y_s можна визначити за виразом

$$Y_s = \frac{1}{1 + \left(\frac{p_0}{\phi \cdot p_{v,sat}(T_s)} - 1 \right) \frac{R_v}{R_a}} \quad (5)$$

де $p_{v,sat}(T_s)$, Па - парціальний тиск насиченої водяної пари при температурі T_s , К; R_v ; R_a , Дж/(кг•К) - газові сталі для водяної пари і сухого повітря відповідно; p_0 , Па - сумарний тиск пароповітряної суміші; ϕ - відносна вологість повітря біля поверхні випаровування. Значення $p_{v,sat}(T_s)$ може бути знайдена за виразом, наведеним в [7]

$$p_{v,sat}(T) = 611 \exp \left[\frac{17,08 \cdot (T - 273,15)}{T - 38,97} \right], \quad (6)$$

а відносна вологість повітря біля поверхні випаровування ϕ визначається з експериментально знайдених залежностей рівноважної вологості W_p від відносної вологості ϕ , тобто з ізотерм сорбції - десорбції для температури T_s . Якщо залежність $W_p(\phi)$ апроксимується виразом

$$W_p = a \cdot \left(\frac{\phi}{(1-\phi)} \right)^b, \quad (7)$$

то відповідно

$$\phi = \left[\left(\frac{a}{W_p} \right)^{\frac{1}{b}} + 1 \right]^{-1}. \quad (8)$$

Рівняння перенесення теплоти в області $0 < r < r_s$, в порах якої міститься крапельна волога, має вигляд:

$$\begin{aligned} & [\rho_w C_w \varepsilon + \rho_s C_s (1 - \varepsilon)] \frac{\partial T}{\partial \tau} = \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[(\lambda_w \varepsilon + \lambda_s (1 - \varepsilon)) r \frac{\partial T}{\partial r} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

де ρ , кг/м³ - густина; C , Дж/(кг•К) - теплоємність; λ , Вт/(м•К) - теплопровідність. Величини з індексом w - відносяться до води, а з індексом s - до твердої фази. Ці значення густини, теплоємності і теплопровідності для рідини і твердої фази вважаються постійними.

Рівняння перенесення теплоти в області $r_s < r < r_0$, в якій міститься пароповітряна суміш, має вигляд:

$$\begin{aligned} & [(\rho_v C_v + \rho_a C_a) \varepsilon + \rho_s C_s (1 - \varepsilon)] \frac{\partial T}{\partial \tau} = \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r (\lambda_g \varepsilon + \lambda_s (1 - \varepsilon)) \frac{\partial T}{\partial r} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

В рівнянні (10) величини з індексом v відносяться до водяної пари, а індексом a - до сухого повітря. Перенесенням теплоти дифузійними потоками водяної пари та сухого повітря в даній наближеній моделі можна знехтувати без суттєвої втрати її точності. Величина теплопровідності пароповітряної суміші розраховується за виразом $\lambda_g = \lambda_v Y + \lambda_a (1 - Y)$.

Для рівняння (9) гранична умова при $r=0$ має вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (11)$$

Для рівняння (10) гранична умова при $r = r_0$ має вигляд

$$\begin{aligned} & -(\lambda_g \varepsilon + \lambda_s (1 - \varepsilon)) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \\ & = \alpha(T(r_0) - T_T). \end{aligned} \quad (12)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі на поверхні циліндричної гранули; T_T - температура теплоносія.

На поверхні випаровування ($r=r_s$) умова спряження для рівнянь (9) і (10) має вигляд:

$$\begin{aligned} & -[\lambda_w \varepsilon + \lambda_s (1 - \varepsilon)] \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_s-0} = \\ & = -[\lambda_g \varepsilon + \lambda_s (1 - \varepsilon)] \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_s+0} - \\ & - \Delta h \cdot \varepsilon \rho_g \frac{D}{\zeta} \frac{\partial Y}{\partial r} \Big|_{r=r_s+0}. \end{aligned} \quad (13)$$

де Δh - теплота випаровування води. Вираз (13) відображає баланс теплоти на поверхні розподілу рідкої та газової фаз, згідно з яким теплота, що надходить теплопровідністю з боку газової фази до поверхні

випаровування, частково витрачається на випаровування рідини, а частково переноситься теплопровідністю вглиб рідкої фази.

У випадку, коли в початковий момент часу пори повністю заповнені рідиною, а область з пароповітряною сумішшю ще не сформувалася і випаровування рідини відбувається з поверхні гранули, замість граничної умови у формі (12) застосовується умова

$$-[\lambda_w \varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon)] \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} =$$

$$= \alpha(T(r_0) - T_T) + \varepsilon \cdot \Delta h \cdot \beta(Y(r_0) - Y_T),$$

яка враховує теплоту випаровування води з поверхні гранули.

Для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі α та масовіддачі β з поверхні циліндричної гранули застосовуються рівняння подібності [8]:

$$Nu_t = 0,5 \cdot Re^{0,5} Pr_t^{0,38} (Pr_{t,T}/Pr_{t,\pi})^{0,38} \quad (15)$$

$$Nu_m = 0,5 \cdot Re^{0,5} Pr_m^{0,38} (Pr_{m,T}/Pr_{m,\pi})^{0,38} \quad (16)$$

що описують інтенсивність тепло - та масовіддачі з поверхонь циліндрів при їх зовнішньому обтіканні теплоносієм. В наведених рівняннях: $Nu_t = \frac{\alpha d}{\lambda_a}$; $Nu_m = \frac{\beta d}{\rho_\tau D_\tau}$; $Re = \frac{V d}{\nu_\tau}$; $Pr_t = \frac{\nu_\tau}{a_\tau}$; $Pr_m = \frac{\nu_\tau}{D}$; d - діаметр гранули; V - швидкість потоку теплоносія, що обтікає гранулу; ν_m - кінематичний коефіцієнт в'язкості теплоносія (нагрітого повітря); a_m - коефіцієнт температуропровідності теплоносія. Величини з індексом "т" визначаються за температурою теплоносія, а з індексом "п" - за температурою поверхні гранули.

Зміну у часі радіальної координати поверхні випаровування рідини r_s визначається з диференціального рівняння:

$$\rho_w F dr_s = F j d\tau$$

де F - поверхні, з якої відбувається випаровування. Після спрощень це рівняння матиме вигляд

$$\frac{dr_s}{d\tau} = \frac{j}{\rho_w} \quad (17)$$

Система диференціальних рівнянь (3), (9), (10) з граничними умовами (3), (4), (11)-(14) розв'язується методом скінчених рівниць. З цією метою в розрахунковій області $0 < r < r_0$ будується різницева сітка з кроком $dr = r_0/N$, де N - кількість елементів сітки. Вузли сітки, до яких відносяться дискретні значення температури, розташовуються на середині елементів. Номер кроку сітки, на кому закінчується область (3), що зайнята рідиною, позначається як i_w . Рівняння (3), (9), (11) в скінчених різницях мають вигляд:

$$i_w + 1 < i < N:$$

$$\rho^*_{g,i} \frac{Y_i - Y^*_i}{\Delta \tau} = \frac{1}{dr_i r_{i-1/2}} \left(\rho^*_{g,i+1/2} r_i \frac{D}{\zeta} \frac{Y_{i+1} - Y_i}{dr_{i+1/2}} - \rho^*_{g,i-1/2} r_{i-1} \frac{D}{\zeta} \frac{Y_i - Y_{i-1}}{dr_{i-1/2}} \right); \quad (18)$$

$$1 < i < i_w:$$

$$(C_w \rho_w \varepsilon + \rho_s C_s (1 - \varepsilon)) \frac{T_i - T^*_i}{\Delta \tau} = \frac{(\lambda_w \varepsilon + \lambda_s (1 - \varepsilon))}{r_{i-1/2} dr_i} \left(r_i \frac{T_{i+1} - T_i}{dr_{i+1/2}} - r_{i-1} \frac{T_i - T_{i-1}}{dr_{i-1/2}} \right); \quad (19)$$

$$i_w + 1 < i < N:$$

$$\begin{aligned} [(C_a \rho_{a,i} + C_v \rho_{v,i}) \varepsilon + \rho_s C_s (1 - \varepsilon)] \frac{T_i - T^*_i}{\Delta \tau} = \\ = \frac{1}{r_{i-1/2} dr_i} \times \\ \times \left(r_i \left(\lambda_{g,i+1/2} \varepsilon + \lambda_s (1 - \varepsilon) \right) \frac{T_{i+1} - T_i}{dr_{i+1/2}} - r_{i-1} \left(\lambda_{g,i-1/2} \varepsilon + \lambda_s (1 - \varepsilon) \right) \frac{T_i - T_{i-1}}{dr_{i-1/2}} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

В рівняннях (18)-(20):

$$\rho_{g,i+1/2} = (\rho_{g,i+1/2} + \rho_{g,i})/2;$$

$$\rho_{g,i-1/2} = (\rho_{g,i-1/2} + \rho_{g,i})/2;$$

$$\lambda_{g,i+1/2} = \lambda_a (1 - Y^*_{i+1/2}) + \lambda_v Y^*_{i+1/2};$$

$$\lambda_{g,i-1/2} = \lambda_a (1 - Y^*_{i-1/2}) + \lambda_v Y^*_{i-1/2};$$

$$r_{i-1/2} = (r_i + r_{i-1})/2; dr_{i-1/2} = (dr_i + dr_{i-1})/2;$$

$$dr_{i+1/2} = (dr_i + dr_{i+1})/2;$$

$$\text{при } i=1: dr_{i-1/2} = dr_1/2;$$

$$\text{при } i=N: dr_{i+1/2} = dr_N/2;$$

$$\text{при } i = i_w; dr_{i+1/2} = dr_i/2$$

$$\text{при } i = i_w+1: dr_{i-1/2} = dr_i/2.$$

В рівнянні (19), що складено для елемента рідкої фракції з номером i_w , який знаходиться біля границі з областю, що містить газову фракцію, замість функції T_{i+1} використовується $T_{i_w+1/2}$. Дане значення температури відносяться до поверхні випаровування. В рівнянні (20), що складається для i_w+1 , замість T_{i-1} використовується та ж сама величина $T_{i_w+1/2}$. Це забезпечує нерозривність функції розподілу температури в гранулі.

Рівняння (18)-(20) складені для неявної часовою схемою, за якою невідомі величин відносяться до поточного моменту часу. Величин, що мають індекс *, відносяться до попереднього моменту часу і їх значення вважаються відомими. Граничні умови (3), (4), (11)-(13) також записуються у формі скінчених різниць:

$$-\rho_{g,N+1/2} \frac{D}{\zeta} \frac{Y_{N+1/2} - Y_N}{0,5dr_N} \Big|_{r=r_0} = \beta \left(Y_{N+1/2} - Y_T \right); \quad (21)$$

$$Y_{i_w+1/2} = Y_s(T_{i_w+1/2}, W); \quad (22)$$

$$\frac{T_1 - T_0}{0,5dr_1} = 0; \quad (23)$$

$$-\left(\lambda_{g,N+1/2} \varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon) \right) \frac{T_{N+1/2} - T_N}{0,5dr_N} \Big|_{r=r_0} = \alpha(T_{N+1/2} - T_T); \quad (24)$$

В початковий момент часу, коли поверхня випаровування збігається з поверхнею гранули, ця умова матиме вигляд:

$$-\left(\lambda_{g,N+1/2} \varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon) \right) \frac{T_{N+1/2} - T_N}{0,5dr_N} \Big|_{r=r_0} = \alpha(T_{N+1/2} - T_\infty) + \varepsilon \Delta h \beta (Y_{N+1/2} - Y_T) \quad (25)$$

Якщо поверхня випаровування знаходиться всередині гранули, умова спряження (13) в скінчених різницях матиме вигляд:

$$-\left[\lambda_w \varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon) \right] \frac{T_{i_w+1/2} - T_{i_w}}{0,5dr_{i_w}} = -\left[\lambda_{g,i_w+1/2} \varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon) \right] \frac{T_{i_w+1} - T_{i_w+1/2}}{0,5dr_{i_w+1}} - \Delta h \cdot \varepsilon \rho_{g,i_w+1/2} \frac{D}{\zeta} \frac{Y_{i_w+1} - Y_{i_w+1/2}}{0,5dr_{i_w+1}} \quad (26)$$

В граничних умовах (21), (24), (25) величини $T_{N+1/2}$ та $Y_{N+1/2}$ відносяться до поверхні гранули, а величини $T_{i_w+1/2}$ та $Y_{i_w+1/2}$ відносяться до поверхні випаровування, що в поточний час знаходиться між основними вузлами сітки з номерами i_w та i_w+1 . Величина $T_{i_w+1/2}$ визначається з умови (26) і має вигляд:

$$T_{i_w+1/2} = \frac{\frac{\lambda_w^-}{0,5dr_{i_w}}}{\frac{\lambda_g^+}{0,5dr_{i_w+1}} + \frac{\lambda_w^-}{0,5dr_{i_w}}} T_{i_w} + \frac{\frac{\lambda_g^+}{0,5dr_{i_w+1}}}{\frac{\lambda_g^+}{0,5dr_{i_w+1}} + \frac{\lambda_w^-}{0,5dr_{i_w}}} T_{i_w+1} + \frac{\Delta h \cdot \varepsilon \rho_{g,i_w+1/2} \frac{D}{\zeta} \frac{Y_{i_w+1}^* - Y_{i_w+1/2}^*}{0,5dr_{i_w+1}}}{\frac{\lambda_g^+}{0,5dr_{i_w+1}} + \frac{\lambda_w^-}{0,5dr_{i_w}}} \quad (27)$$

$$\text{де } \lambda_w^- = \lambda_w \varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon); \lambda_g^+ = \lambda_{g,i_w+1/2} \varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon).$$

За значенням $T_{i_w+1/2}$ розраховується також величина $Y_{i_w+1/2}$. Для цього застосовується вираз (5). Цей вираз містить величини $p_{v,sat}(T_s)$ та $\dots$. Величина $p_{v,sat}$ розраховується за виразом (6), в якому $T_s = T_{i_w+1/2}$. Для розрахунку величини використовується співвідношення (8), яке містить вологість гранули W . За визначенням, вологість розраховується як відношення маси рідкої фракції, що містить гранула, до маси твердого скелету гранули за відсутності вологи. За прийнятою моделлю,

$$W = \frac{\rho_w U_w}{\rho_s U_s} \quad (28)$$

де $U_w = \varepsilon \pi r_s^2 L$ - об'єм рідкої фракції; $U_s = (1 - \varepsilon) \pi r_0^2 L$ - об'єм твердої фракції; r_s - радіус поверхні випаровування; r_0 - початковий радіус гранули; L - довжина гранули. Радіус поверхні випаровування циліндричної гранули r_s^k в момент часу τ_k визначається з диференціального рівняння (17), яке розв'язується чисельним методом:

$$r_s^k = r_s^{k-1} + \frac{j_v \Delta \tau}{\rho_w}, \quad (29)$$

де r_s^{k-1} - радіус поверхні випаровування в попередній момент часу. Густина потоку пари j_v з поверхні випаровування визначається за виразом:

$$j_v = \rho_{g,i_w+1/2} \frac{D}{\zeta} \frac{Y_{i_w+1} - Y_{i_w+1/2}}{0,5 \Delta r_{i_w+1}}. \quad (30)$$

Номер i_w останнього елемента області, що містить рідку вологу, визначається з умови $r_{i_w} \leq r_s < r_{i_w+1}$. Тобто поверхня випаровування, що має радіус r_s , повинна перетинати елемент з номером i_w . Цей номер, як і радіус r_s , змінюється у часі.

Система різницевих рівнянь (18)-(20) з граничними умовами (21)-(25) та умовами спряження (26), (27) розв'язується методом прогонки. За результатами цього розв'язання визначається розподіл температури T_i та концентрації водяної пари Y_i вздовж радіуса гранули, а також залежність цих величин від часу.

Як приклад розглядається процес тепломасообміну при конвекційному сушінні гранули діаметром $d=6$ мм ($r_0=3$ мм), що виготовлена на шнековому механічному пристрої і містить 50% мулу та 50% торфу. Швидкість теплоносія (повітря) $V_m = 2$ м/с, температура $t_m = 120^\circ\text{C}$, відносна вологість $\phi_m = 0,956$ %. Відносна концентрація водяної пари в теплоносії за цих параметрів становить $Y_m = 0,01172$. Коефіцієнт тепловіддачі становить $\alpha = 21$ Вт/(м²К), а коефіцієнт масовіддачі - $\beta = 0,02086$ кг/(м²с). Приймається, що пористість матеріалу гранули складає $\varepsilon = 0,29$. Густина скелету гранули дорівнює $\rho_s = 600$ кг/м³, його теплоємність складає $C_s = 840$ Дж/(кг•К), а теплопровідність - $\lambda_s = 0,35$ Вт/(м•К). Теплофізичні властивості води в порах: $\lambda_w = 0,618$ Вт/(м•К); $C_w = 4174$ Дж/(кг•К); $\rho_w = 1000$ кг/м³. Теплофізичні властивості пароповітряної суміші в порах залежать як від температури, так і від концентрації водяної пари, які змінюються вздовж радіуса гранули і у часі. В початковий момент часу значення цих параметрів складають: $\lambda_g = 0,0267$ Вт/(м•К); $C_g = 1005$ Дж/(кг•К); $\rho_g = 1,165$ кг/м³. Теплота випаровування дорівнює $\Delta h = 2,4538$ 10⁶ Дж/кг. Початкова температура гранули складає $t_0 = 30^\circ\text{C}$. Початкова вологість гранули W розраховується за залежністю (28), для якої приймаються $r_s = r_0$, тобто вважається що всі пори гранули в початковий момент часу заповнені рідкою фазою. З цього випливає, що $W_0 = \frac{\rho_w \varepsilon}{\rho_s (1-\varepsilon)} = 0,68$.

Результати розрахунків температурно - вологісного стану гранули, що виготовлена на шнековому механічному пристрої і містить 50% мулу та 50% торфу, представлено на рисунках 4 – 8. На рис.8 наведено зміну у часі радіусу поверхні випаровування. Початковий радіус відповідає радіусу гранули і становить 3,0 мм. За 24 хвилини сушіння в даному режимі цей радіус зменшується до 0,9 мм.

Характер зміни у часі густини потоку пари з поверхні випаровування видно з рисунку 3.35. З рисунку видно, що за перші 2 хвилини густина потоку маси збільшується з $0,74 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²с) до $1,7 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²с). Далі густина потоку маси продовжує збільшуватися до $\tau = 11$ хв, але повільніше. Потім дана величина починає зменшуватися.

Результати розрахунків температурно - вологісного стану гранули, що виготовлена на шнековому механічному пристрої і містить 50% мулу та 50% торфу, представлено на рисунках 4 – 8. На рис.8 наведено зміну у часі радіусу поверхні випаровування. Почат-

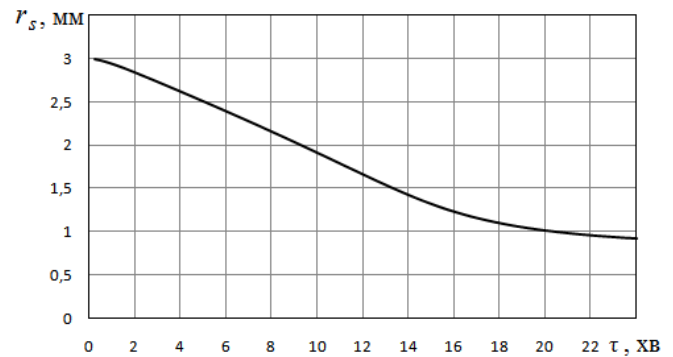


Рис. 4. Зміна у часі радіусу поверхні випаровування при сушінні гранули, що містить 50% мулу та 50% торфу при $t_m = 120^\circ\text{C}$, $V_m = 2$ м/с, $d = 6$ мм

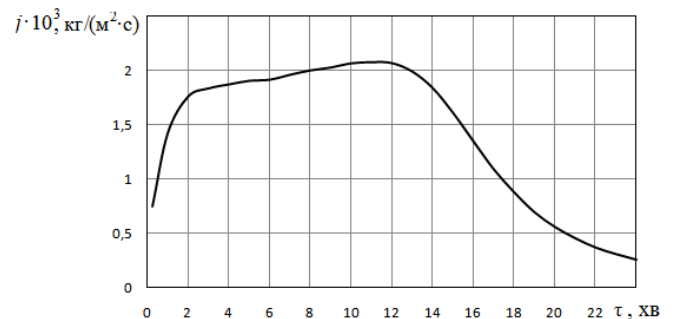


Рис. 5. Зміна у часі густини потоку маси пари при сушінні гранули що містить 50% мулу та 50% торфу при $t_m = 120^\circ\text{C}$, $V_m = 2$ м/с, $d = 6$ мм

ковий радіус відповідає радіусу гранули і становить 3,0 мм. За 24 хвилини сушіння в даному режимі цей радіус зменшується до 0,9 мм.

Характер зміни у часі густини потоку пари з поверхні випаровування видно з рисунку 3.35. З рисунку видно, що за перші 2 хвилини густина потоку маси збільшується з $0,74 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ до $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2\text{с)}$. Далі густина потоку маси продовжує збільшуватися до $\tau=11$ хв, але повільніше. Потім дана величина починає зменшуватися.

Зростання густини потоку маси викликано збільшенням температури поверхні випаровування на початковій стадії сушіння. Внаслідок цього збільшується відносна масова концентрація водяної пари біля цієї поверхні Y_s . Але далі, по мірі зменшення вологості гранули W , відносна вологість повітря біля поверхні випаровування починає зменшуватися навіть при зростанні температури поверхні випаровування. Тому зменшується також і Y_s (рисунок 6).

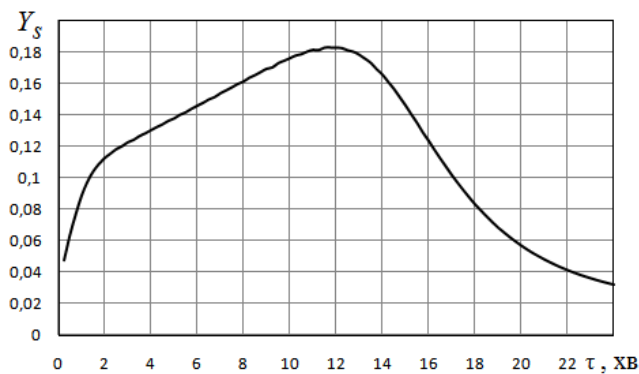


Рис. 6. Зміна у часі відносної вагової концентрації водяної біля поверхні випаровування при $t_m = 120^\circ\text{C}$, $V_m = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$

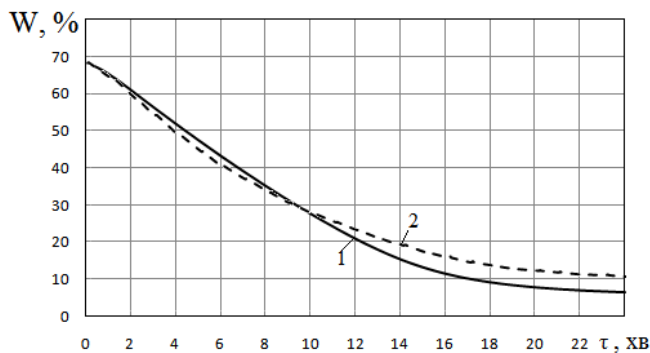


Рис. 7. Зміна у часі вологості гранули, що містить 50% мулу та 50% торфу при $t_m = 120^\circ\text{C}$, $V_m = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$:
1 - теоретичні розрахунки; 2 - експеримент

Внаслідок видалення пароподібної вологи з поверхні випаровування, зменшується вологість гранули W . Ця величина розраховується за виразом (28). Зміна цієї величини у часі наведена на рисунку 7. На цьому рисунку представлено як залежність, що одержана за наведеною розрахунковою моделлю (крива 1), так і дані, одержані з експерименту (крива 2).

Ця експериментальна крива наведена також на рисунку 8 (крива 2). Як видно з зіставлення цих кривих, наближена розрахункова модель у цілому задовільно описує характер зміни у часі вологості гранули при її сушінні в умовах, що розглядаються. Найбільша розбіжність розрахункових і експериментальних даних спостерігається в кінці інтервалу сушіння. Експериментальна значення вологості складає $W_e = 10,67 \%$, а розрахункове $W_p = 6,37 \%$.

Зміну у часі температури у центрі гранули ($r=0$), що визначена за результатами розрахунків, наведено на рисунку 8 (крива 1). На цьому ж рисунку представ-

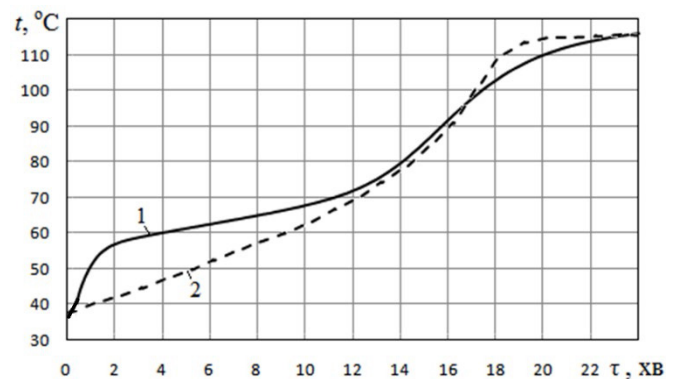


Рис. 8. Зміна у часі температури центру гранули, що містить 50% мулу та 50% торфу при $t_m = 120^\circ\text{C}$, $V_m = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$:
1 - теоретичні розрахунки; 2 - експеримент.

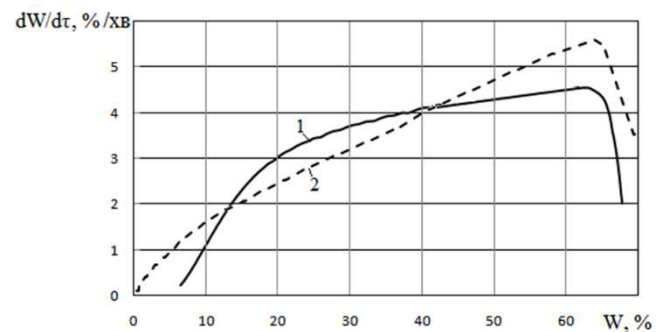


Рис. 9. Залежність швидкості сушіння від вологості для гранули, що містить 50% мулу та 50% торфу при $t_m = 120^\circ\text{C}$, $V_m = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$:
1 - теоретичні розрахунки; 2 - експеримент

лено дані експерименту (крива 2), що відповідають кривій 2' на рисунку 1. Як видно з зіставлення цих кривих, розрахункові значення температури на початковій стадії сушіння вищі (на 10...12 °C), ніж ті, що одержано з експерименту. В середній частині часового інтервалу ці данні майже збігаються. На завершальній стадії розрахункові температури дещо нижчі (на 4...5 °C), ніж експериментальні. В кінці процесу сушіння ці дані знову майже збігаються.

Залежність швидкості сушіння від вологості наведено на рисунку 9. Суцільна крива відповідає результатам розрахунків за наведеною моделлю, а крива 2- результатам експериментальних досліджень, що наведені також на рисунку. 2 (крива 1). За даними експериментів максимальна швидкість сушіння спостерігається при $W=63,9\%$ і становить $dW/dt=5,6\%/хв$. Розрахункові результати показують, що максимальна швидкість сушіння не перевищує $dW/dt=4,55\%/хв$ і відповідає близьким до експериментальним значенням вологості $W=61,0\%$.

З зіставлення результатів розрахунків за запропонованою моделлю заглиблення зони випаровування з результатами експериментальних досліджень випливає, що дана модель у цілому задовільно описує характер зміни у часі температури в центрі гранули і її вологості в процесі конвекційного сушіння. Але в кількісних показниках є певні розбіжності. Розрахункові значення температури в центрі гранул найбільш суттєво відрізняються на початковому та завершальному етапах процесу сушіння. В середній частині та наприкінці часового інтервалу сушіння ці значення практично збігаються (рисунк 6). Найбільші відхилення розрахункових значень вологості гранули від експериментальних відзначаються наприкінці інтервалу сушіння. Розрахункові значення вологості в кінці процесу сушіння виявляються меншими, ніж експериментальні. У цілому ж можна відзначити, що розглянута модель може застосовуватися для наближеної попередньої оцінки часу сушіння гранули, що виготовлена на шнековому механічному пристрої і містить 50% мулу та 50% торфу.

Висновки

Дослідження кінетики сушіння композитних гранул показало, що при температурі теплоносія 80 °C тривалість сушіння збільшується порівняно з 120 °C приблизно у 1,4 рази.

Виконане чисельне моделювання конвективного сушіння композитних гранул показало, що дана модель у цілому задовільно описує характер зміни у часі температури в центрі гранули і її вологості в процесі конвекційного сушіння.

ЛІТЕРАТУРА

1. Снежкін Ю.Ф., Корінчук Д.М., Михайлик В.А. Композиційні палива на основі торфу і рослинної біомаси. Сировина, властивості, режими, обладнання, технології. К.-2012. 212 с.
2. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж. А., Пазюк В. М., Новікова Ю.П. Стан технологій очищення стічних вод в Україні та світі. Теплофізика та Теплоенергетика, 2021, Т.43, №1. с. 5 – 12. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.1>
3. Блог Ecosoft. Як працює Бортницька станція аерації. URL: <https://ecosoft.ua/ua/blog/bortnicheskaya-stantsiya-aeratsii/>
4. Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Новікова Ю.П., Петров А.І. Дослідження з переробки торфу на композиційне паливо. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: колективна монографія / за ред. проф. Мальованого М. С. – Київ : Яроченко Я. В., 2022, С. 93 – 103. DOI <https://doi.org/10.51500/7826-23-0>
5. Petrova, Z., Sniezhkin, Y., Paziuk, V., Novikova, Y., Petrov, A. Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. Journal of Ecological Engineering, 2021, 22(6), 159-166.
6. Снежкін Ю.Ф., Корінчук Д.Н. Моделирование высокотемпературной сушки торфа и биомассы в технологиях производства биотоплив. Scientific Works, 2017, 81 (1). С. 125-130.
7. Van Belleghem M. Modelling coupled heat and moisture transfer between air and porous materials for building applications. Ghent University. Faculty of Engineering and Architecture, Ghent, Belgium, 2013. 232 p.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.. Теплопередача. Москва: Энергоиздат, 1981. 416с.

NUMERICAL MODELING OF THE HEAT AND MASS TRANSFER PROCESS DURING DRYING OF COMPOSITE PELLETS

Petrova Zh.O.¹, Corresponding member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), **Davydenko B.V.²**, Dr. Sci. (Engin.), Novikova **Yu.P.³**, PhD (Engin.)

¹*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, professor; bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>*

²*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Research Scientist, bdavydenko@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-8738-7612>*

³*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, yuliiyanovikova3@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>*

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2024.3>

An urgent task at the current level of society's development is to preserve natural resources and the environment from pollution caused by human activity. It is necessary to preserve and increase the capacity of water and land recycling and reuse systems, develop waste-free and resource-saving technologies.

The accumulated sludge deposits from wastewater treatment plants in large cities are outdated, having lost most of their nutrients, become too mineralized and practically unsuitable for direct use as fertilizers.

The research is devoted to the development of a unified approach to the efficient processing of sludge sediments as fuel with the addition of flammable fillers such as milled peat and biomass.

The aim of the study was to conduct research on drying composite raw materials based on obsolete sludge deposits and theoretical analysis of the heat and mass transfer process.

The kinetics of the drying process of composite raw materials on an experimental convective drying bench with automatic data acquisition was studied. The studies show that at a coolant temperature of 80 °C, the drying time increases by about 1.4 times compared to 120 °C.

The numerical simulation of convective drying of composite pellets showed that this model generally satisfactorily describes the nature of the change in the

temperature in the center of the pellet and its moisture content over time during convective drying. In general, it can be noted that the considered model can be used for an approximate preliminary assessment of the drying time of a pellet made on a screw mechanical device in the proportion of 50% silt and 50% peat.

Key words: peat, aged silt deposits, drying.

References 8, figure 9.

1. *Snieszkin Yu.F., Korinchuk D.M., Mykhailyk V.A.* Kompozytsiini palyva na osnovi torfu i roslynnoi biomasy [Composite fuels based on peat and plant biomass]. Syrovyna, vlastyvoli, rezhymy, obladnannia, tekhnolohii, Kyiv, 2012, 212. (in Ukr.).

2. *Snieszkin, Yu., Petrova, Z. Paziuk, V. Novikova, Y.* State of wastewater treatment technologies in ukraine and the world. Thermophysics and Thermal Power Engineering 2021, 43, 5-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.1> (in Ukr.)

3. *Ecosoft blog.* Yak pratsiuie Bortnytska stantsiia aeratsii [How the Bortnitsa aeration station works]. URL: <https://ecosoft.ua/ua/blog/bortnicheskaya-stantsiya-aeratsii/> (in Ukr.)

4. *Petrova Zh.O., Paziuk V.M., Novikova Yu.P., Petrov A.I.* Doslidzhennia z pererobky torfu na kompozytsiine palyvo [Research on the processing of peat into composite fuel]. Sustainable Development: Environmental Protection. Energy Saving. Sustainable Environmental Management: Collective monograph, 2022, 93 – 103. DOI <https://doi.org/10.51500/7826-23-0> (in Ukr.)

5. *Petrova, Z., Snieszkin, Y., Paziuk, V., Novikova, Y., Petrov, A.* Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. Journal of Ecological Engineering, 2021, 22(6), 159-166.

6. *Snieszkin Yu.F., Korinchuk D.N.* Modelirovanie vyisokotemperaturnoy sushki torfa i biomassyi v tehnologiyah proizvodstva biotopliv [Modeling of high-temperature drying of peat and biomass in biofuel production technologies]. Scientific Works, 2017, 81 (1), 125-130.

7. *Van Belleghem M.* Modelling coupled heat and moisture transfer between air and porous materials for building applications. Ghent University. Faculty of Engineering and Architecture, Ghent, Belgium, 2013. 232 p. (in Rus).

8. *Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel, A.S.* Teploperedacha [Heat Transfer]. Moskva: Energoizdat [Moscow: Energoizdat], 1981. 416 p. (in Rus).

Отримано 27.06.2024

Received 27.06.2024

Прийнято до друку 17.08.2024
Accepted for publication 17.08.2024