УДК 536:517

Діктерук М.Г., Човнюк Ю.В., Чмель Ю.О. [1]

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ СИПКИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ КОМБІНОВАНИХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРІВ

АНОТАЦІЯ. Запропонована модель для аналізу процесів нелінійного тепло- масопереносу у тілах еліпсоїдальної форми, яка описує процес сушіння сипких будівельних матеріалів при використанні комбінованих теплогенераторів.

Ключові слова: автоматизований процес, сушіння, сипкі будівельні матеріали, комбіновані теплогенератори.

АННОТАЦИЯ. Предложена модель для анализа процессов нелинейного тепло- массопереноса в телах эллипсоидальной формы, которая описывает процесс сушения сыпучих строительных материалов при использовании комбинированных теплогенераторов.

Ключевые слова: автоматизированный процесс, сушение, сыпучие строительные материалы, комбинированные теплогенераторы.

SUMMARY. A model for the analysis of processes of nonlinear heat and mass tranfer in the ellipsoidal bodies is offered. Such model describes the process of drying of friable build materials with the use help of combined heat generators.

Key words: the automated process, friable build materials, combined heat generators.

Постановка проблеми. Вивчення процесів переносу енергії (тепла), маси речовини має велике теоретичне і практичне значення для обґрунтування і розрахунків інтенсифікованих режимів у теплоенергетичних, енерготехнологічних, хіміко-технологічних та інших процесах. Особливого значення вони набувають у новій техніці, заснованій на енергоощадних технологіях (і, зокрема, у процесах сушіння сипких будівельних матеріалів у комбінованих теплогенераторах, котрі використовують альтернативні джерела тепла). Високі температури, тиски, швидкості, а також дія зовнішніх сил різноманітної фізичної природи обумовлюють взаємодію між окремими процесами, а також призводять до появи нових зв'язків і багатьох вторинних факторів, зазвичай досить корисних і перспективних.

Для обґрунтування закономірності взаємозв'язаних процесів і породжених ними ефектів за останні десятиріччя широкого розвитку набули методи термодинаміки незворотніх процесів, синергетики, статистичної фізики та ін. Ці методи дозволяють вивчати різноманітні процеси переносу у їх нерозривному зв'язку. Для аналітичного опису взаємозв'язаних процесів замість окремих рівнянь руху, переносу тепла, масопереносу використовуються системи взаємозв'язаних рівнянь у частинних похідних, котрі об'єднуються за допомогою так званих «перехресних» - вторинних ефектів (термодифузія, магнітофорез, ефект Пельт'є та ін.). Слід зазначити, що такі системи рівнянь для великої групи, різнохарактерних явищ можуть мати аналогічну математичну інтерпретацію/запис (молекулярні розчини, вологі дисперсні/сипкі середовища та ін.), що дозволяє використати результати досліджень, отриманих у більш вивчених областях техніки і технології, для потреб інших, менш вивчених областей. Цікаво зазначити і те, що за останні роки проблематика взаємозв'язаного переносу стала охоплювати процеси й іншої природи (розвиток пухлин, епідермічних процесів, дослідження біоценозів та екологічних систем та ін.).

Розв'язок взаємозв'язаних систем диференціальних рівнянь представляє певні математичні труднощі: лише у деяких випадках вдається отримати аналітичні рішення. Частіше дослідники вимушені шукати симбіоз\синтез аналітичних та чисельних розв'язків відповідних задач або ж використовувати тільки останні розв'язки.

Загальний рівень розвитку науки, техніки і технології (у т.ч. сушіння сипучих матеріалів) диктує необхідність опанування вченими, дослідниками, експериментаторами нової області – нелінійних нестаціонарних задач взаємозв'язаного тепло- і масопереносу. У математичній постановці це веде до появи нелінійності у коефіцієнтах переносу, джерелах чи витоках енергії, до появи нелінійних граничних умов. Ці задачі значно ближчі до життя, але їх реалізація набагато складніша, і тому не завжди доводиться до кінця класичними методами математичної фізики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вперше узагальнення аналітичної теорії лінійного взаємозв'язаного тепло- і масопереносу на прикладі різних дисперсних систем було дано у монографіях А.В. Ликова та Ю.А. Михайлова [1,2]. У подальшому ці роботи отримали багатоплановий

[1] Діктерук М.Г., к.т.н., доцент., Київський національний університет будівництва і архітектури; Човнюк Ю.В., к.т.н., доцент. Національний університет біоресурсів і природокористування України; Чмель Ю.О., магістр. Київський національний університет будівництва і архітектури.

розвиток у різних областях науки і техніки [3,4]. Наближені розв'язки нелінійних нестаціонарних задач тепло- і масообміну для дисперсних середовищ отримані у роботах [5-10]. Задачі нелінійного взаємозв'язаного тепло- й масопереносу у капілярно-пористому середовищі еліпсоїдальної форми, які моделюють процеси переносу у окремих гранулах/частках сипких будівельних матеріалів при сушінні останніх у комбінованих теплогенераторах, раніше не розглядались.

Мета дослідження – запропонувати адекватну тривимірну модель нелінійного взаємозв'язаного тепло- і масопереносу всередині еліпсоїду з використанням варіаційного формулювання у вигляді принципу Гамільтона з граничним переходом [4,11], яка описує вказані процеси переносу у гранульованих/сипких матеріалах при сушінні останніх у сушарках, котрі забезпечуються теплом від комбінованих теплогенераторів. На основі розробленої фізико-механічної (та математичної) моделі розробити автоматизовану систему управління процесом сушіння сипкого матеріалу, яка контролює основні температурні параметри останнього, його вологомісткість і регулює подачу тепла від альтернативного джерела енергії у разі відхилення параметрів сушарки від тих, що відповідають паспортному режиму її функціонування.

Виклад основного матеріалу.

1. Некласичне варіаційне формулювання у теорії теплопровідності та нерівноважній термодинаміці.

Вуянович В. у [11] запропонував некласичне варіаційне формулювання у теорії теплопровідності. Варіаційні принципи, запропоновані вказаним автором, засновані на ідеї послідовного варіювання функціоналу певного типу і граничного переходу у рівняннях Ейлера за малим параметром. Для цього у функціонал I вводять параметр τ, котрий не приймає участі у варіюванні:

$$I = I\left(\theta, \dot{\theta}, \frac{\partial\theta}{\partial x_i}, ..., \tau\right), \tag{1}$$

де $\theta = \theta(x_1, x_2, x_3, t)$ – температура; $x_i\,(i = 1,2,3)$ – просторові координати, t – час, $\dot{\theta} \equiv \dfrac{\partial\theta}{\partial t}$. Після завершення варіювання τ→0, що призводить до коректних диференціальних рівнянь для розглядуваного процесу.

Запропонований автором [11] варіаційний принцип такого типу має наступну форму:

$$\delta\left\{\int_t\int_V L\left(t, \dot{\theta}, \frac{\partial\theta}{\partial x_i}, \tau\right)dVdt\right\} = 0, \tag{2}$$

де підінтегральний вираз – функція Лагранжа – має вид:

$$L = \left[\left(\tau\cdot\frac{c}{2}\cdot\dot{\theta}^2 - \frac{\lambda}{2}\cdot\sum_{i=1}^{3}\left(\frac{\partial\theta}{\partial x_i}\right)^2\right)\right]\cdot\exp\left[\frac{t}{\tau}\right], \tag{3}$$

де c – питома теплоємність, λ – коефіцієнт теплопровідності (у разі опису процесів масопереносу ці коефіцієнти відповідно означають питому масоємкість та коефіцієнт масопровідності) матеріалу.

Рівняння Ейлера для (3) набуває вигляду:

$$+\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial L}{\partial\dot{\theta}}\right) + \sum_{j=1}^{3}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial L}{\dfrac{\partial\theta}{\partial x_j}}\right) = 0, \tag{4}$$

або:

$$\tilde{N}\cdot\tau\cdot\ddot{\theta} + \tilde{n}\cdot\dot{\theta} = \lambda\cdot\nabla^2\theta, \quad \ddot{\theta} = \frac{\partial^2\theta}{dt^2}, \tag{5}$$

де ∇^2 – оператор Лапласа, ∇ – оператор Гамільтона.

Після виконання операції τ→0 воно (5) перетворюється у рівняння теплопровідності параболічного типу:

$$\dot{\theta} = \lambda\cdot\Delta\theta, \quad \Delta \equiv \nabla^2. \tag{6}$$

Варіаційний принцип розглянутого типу можна назвати принципом з граничним переходом. У теорії теплопровідності цей прийом дозволяє вирішувати не тільки лінійні задачі, але і ряд задач як з внутрішньою, так і з зовнішньою нелінійністю.

2. Постановка задачі (загальний вигляд).

У загальному випадку слід вивчити граничну задачу для системи з n нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних, яка описує взаємозв'язаний перенос n субстанцій всередині просторової області V, обмеженої кусково-гладкою поверхнею S. На поверхні відбувається взаємодія розглядуваного явища із зовнішнім середовищем, котра визначається граничними умовами. Задача при цьому може бути записана у формі:

$$\tilde{N}_i(\theta)\cdot\dot{\theta}_i = \sum_{k=1}^{n} div\{b_{ik}(\theta)\cdot grad(\theta_k)\} + \omega_i(\theta),$$
$$(\mathrm{i} = 1,2,\ldots,\mathrm{n}) \tag{7}$$

за початкових умов:

$$\theta_i(P,0) = M_i(P), \quad P \in V, \tag{8}$$

і граничних умов виду:

$$\theta_i(P_1,t) = \Phi_i(P_1,t), \quad P_1 \in S_1, \tag{9}$$

$$\frac{\partial}{\partial n}\theta_i(P_2,t) = Q_i(P_2,t), \quad P_2 \in S_2, \tag{10}$$

$$\frac{\partial}{\partial n}\theta_i(P_3,t) = F_i(\theta(P_3,t)),\ P_3 \in S_3,\ (i = 1,2,...,n), \tag{11}$$

де $\theta = (\theta_1, \theta_2, ..., \theta_n)$; $\theta_i = \theta_i(x,t)$, – залежні змінні (неперервні разом зі своїми похідними до другого порядку включно функції (потенціали переносу)); $S = S_1 \bigcup S_2 \bigcup S_3$ – поверхня взаємодії; $P = P(x)$ – поточна точка у області $\overline{V} = V \bigcup S$; $x = (x_1; x_2; x_3)$; $C_i, b_{ik}, \omega_i, F_i (i,k = 1,2,...n)$ – неперервні функції залежних змінних; M_i – задані функції просторових координат; Φ_i, Q_i – задані функції просторових координат і часу.

Вирази (9), (10) представляють собою граничні умови першого і другого роду, записані для випадку n змінних, а (11) узагальнює граничні умови третього роду (однак функції F_i у загальному випадку можуть залежати від потенціалів переносу нелінійним чином). У такому виді рівняння (7)-(11), згідно класифікації [7], представляють собою нелінійну крайову задачу, де нелінійність існує як у системі основних рівнянь, так і у граничних умовах.

Створення єдиного підходу до моделювання явищ, які приводять до задач типу (7)-(11), дає можливість отримувати результати, які можуть бути використані для кожної конкретної задачі незалежно від її змісту формально, шляхом їх «налаштування» на параметри конкретної досліджуваної системи. Це полегшує, у свою чергу, і застосування розвинутих методів розв'язку таких задач, і оцінку отримуваних результатів.

3. Тривимірний випадок. Нелінійний взаємозв'язаний тепло- і масопереносу всередині еліпсоїда.

Розглядаючи задачі взаємозв'язаного тепло- і масоперенос у тривимірних середовищах об'єму *V*, доцільно використовувати варіаційні формулювання у вигляді принципу Гамільтона з граничним переходом. Разом із достатньою точністю розв'язків вони призводять тут до простих обчислювальних процедур. У якості прикладу розглянемо задачу взаємозв'язаного тепло- й масопереносу у капілярно-пористому середовищі еліпсоїдальної форми (геометрична модель частинки сипкого матеріалу, який знаходиться у сушарці). Слід зазначити, що до вказаних типів матеріалів відносяться різноманітні будівельні суміші, а також, зокрема, зерно, яке необхідно тривалий час зберігати у певному стані (за показниками температури і вологості) до моменту його подальшого використання (для сівби або переробки у борошно та ін.). Вважатимемо, що коефіцієнт теплопровідності середовища

лінійно залежить від температури (нелінійний фактор задачі).

Нехай *a,b,c* – напіввісі еліпсоїда. Вводячи безрозмірні координати:

$$X_1 = \frac{x_1}{a}, X_2 = \frac{x_2}{b}, X_3 = \frac{x_3}{c}, F_o = \frac{a_q \cdot t}{c^2}, \quad (12)$$

де F_o – критерій Фур'є, c – коефіцієнт теплоємкості, *t* – час, a_q – коефіцієнт теплопровідності середовища, можна рівняння обмежуючої поверхні *S* записати як:

$$X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 = 1, \quad (13)$$

а систему рівнянь тепло- і масопереносу всередині об'єму *V*, обмеженого поверхнею *S*, у виді:

$$\dot{\theta}_1 = d_1^2 \cdot \frac{\partial}{\partial X_1}\left(M \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial X_1}\right) + d_2^2 \cdot \frac{\partial}{\partial X_2}\left(M \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial X_2}\right) + \frac{\partial}{\partial X_3}\left(M \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial X_3}\right) - K_0^* \cdot \dot{\theta}_2;$$

$$\dot{\theta}_2 = -Lu \cdot Pn \cdot \left(d_1^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial X_1^2} + d_2^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial X_2^2} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial X_3^2}\right) + Lu \cdot \left(d_1^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial X_1^2} + d_2^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial X_2^2} + \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial X_3^2}\right), \quad (14)$$

де $\theta_1 = \theta_1(X_1, X_2, X_3, F_o)$ – безрозмірна температура; $\theta_2 = \theta_2(X_1, X_2, X_3, F_o)$ – безрозмірний потенціал масопереносу; $M(\theta_1) = 1 + m \cdot \theta_1$; $d_1 = \frac{\tilde{n}}{a}$; $d_2 = \frac{\tilde{n}}{b}$; *m* – коефіцієнт нелінійності середовища (за температурою); $K_0^* = \varepsilon \cdot K_0$ – модифікований крите-рій Коссовича, ε – критерій фазового перетворення, K_0 – критерій Коссовича; *Lu* – критерій Ликова; *Pn* – критерій Поснова.

Граничні умови приймаємо у вигляді:

$$\begin{cases} \theta_i(X_1, X_2, X_3, F_o)\big|_s = \theta_{i1}, \\ \theta_i(X_1, X_2, X_3, 0) = \theta_{i0}, \end{cases}$$
$$\theta_{i0}, \theta_{i1} = const, \ (i = 1,2). \quad (15)$$

Використовуючи варіаційний принцип Гамільтона з граничним переходом за параметром Δ:

$$\delta I = \delta \int_{F_o} dF_o \int_V L dV = 0, \quad (16)$$

Запишемо функцію Лагранжа у виді:

$$L = \frac{\Delta}{2} \cdot \left\{ \left[\dot{\theta}_1 - d_1^2 \cdot \frac{\partial}{\partial X_1}\left(M \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial X_1}\right) - d_2^2 \cdot \frac{\partial}{\partial X_2} \cdot \left(M \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial X_2}\right) - \frac{\partial}{\partial X_3}\left(M \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial X_3}\right) + K_0^* \cdot \dot{\theta}_2 \right]^2 + \right.$$

$$+\left[\dot{\theta}_2+Lu\cdot Pn\cdot\left(d_1^2\cdot\frac{\partial^2\theta_1}{\partial X_1^2}+d_2^2\cdot\frac{\partial^2\theta_2}{\partial X_2^2}+\frac{\partial^2\theta_2}{\partial X_3^2}\right)-\right.$$
$$\left.\left. Lu\cdot\left(d_1^2\cdot\frac{\partial^2\theta_2}{\partial X_1^2}+d_2^2\cdot\frac{\partial^2\theta_1}{\partial X_2^2}+\frac{\partial^2\theta_1}{\partial X_3^2}\right)\right]^2\right\}\cdot\exp\left(\frac{F_o}{\Delta}\right). \quad (17)$$

У основу апроксимуючих функцій покладемо структуру розв’язку нестаціонарної задачі теплопровідності для еліпсоїда, отриману у роботі [12] за граничних умов виду (15) методом П.В.Цоя. Приймаємо:

$$\dot{\theta}_i=\theta_{i0}+\left(\theta_{i1}-\theta_{i0}\right)\cdot\left\{1-\left(1-X_1^2-X_2^2-X_3^2\right)\times\right.$$
$$\left.\times\left(1{,}958-1{,}038\cdot\left(X_1^2+X_2^2+X_3^2\right)\right)\cdot\varphi_i\left(F_0\right)\right\},\ (i=1{,}2). \quad (18)$$

Використовуючи апроксимацію (18), функцію Лагранжа (17) й переходячи до рівнянь Ейлера при $\Delta\to 0$ отримаємо наступну задачу Коші для визначення невідомих функцій φ_i:

$$\begin{cases} 9{,}720\cdot B_1\cdot\dot{\varphi}_1+5{,}056\cdot\left(K_0^*\right)^2\cdot B_1\cdot B_2\cdot\dot{\varphi}_2+ \\ +50{,}668\cdot m\cdot B_1^3\cdot\alpha\cdot\varphi_1^2+16{,}664\times \\ \times B_1^2\cdot\alpha\cdot\left[1+m\left(\theta_{10}+B_1\right)\right]\cdot\varphi_1=0; \\ 5{,}056\cdot K_0^*\cdot B_1\cdot B_2\cdot\dot{\varphi}_1+B_2^2\left(5{,}056+9{,}720\cdot\left(K_0^*\right)^2\right)\times \\ \times\dot{\varphi}_2+50{,}668\cdot B_1^2\cdot B_2\cdot K_0^*\cdot m\cdot\alpha\cdot\varphi_1^2+B_1\cdot B_2\cdot\alpha\times \\ \times\left\{16{,}644\cdot\left[K_0^*\cdot(1+m\cdot\theta_{10})+Lu\cdot \mathrm{Pn}\right]+16{,}656\cdot B_1\cdot K_0^*\cdot m\right\}\times \\ \times\varphi_1+16{,}644\cdot B_2^2\cdot Lu\cdot\alpha\cdot\varphi_2=0, \\ \varphi_1(0)=1,\varphi_2(0)=1, \end{cases} \quad (19)$$

де $B_i=\theta_{i1}-\theta_{i0}$, $(i=1{,}2)$;

$\alpha=1+d_1^2+d_2^2$.

У таблиці 1 наведені функції φ_1 та φ_2, отримані з (19) при $K_o^*=0{,}3$, *Pn=0,5, Lu=2*, $\theta_{10}=\theta_{10}=0$, $\theta_{11}=\theta_{21}=1$, $d_1=2$, $d_2=3$.

Таблиця 1.

Значення функцій φ_1 та φ_2 у (18) ($K_o^*=0{,}3$, *Pn=0,5, Lu=2*, $\theta_{10}=\theta_{20}=0$, $\theta_{11}=\theta_{21}=1$)

F0	*m=0,0*		*m=0,1*		*m=0,5*	
	ф1	*ф2*	*ф1*	*ф2*	*ф1*	*ф2*
0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,05	0,3265	-0,0151	0,2401	0,0893	0,0967	0,3275
0,10	0,1066	-0,3466	0,0663	-0,1416	0,0161	0,2470
0,15	0,0348	-0,4549	0,019	-0,2061	0,0029	0,2333
0,20	0,0114	-0,4902	0,0058	-0,2247	0,0005	0,2308
0,25	0,0037	-0,5018	-0,0016	-0,2301	0,0002	0,2304
0,30	0,0012	-0,5055	0,0005	-0,2317	0,0001	0,2303
0,35	0,0004	-0,5068	0,0002	-0,2321	0,0000	0,2301
0,40	0,0001	-0,5072	0,0001	-0,2322	0,0000	0,2300
F0	*m=1,0*		*m=1,5*		*m=2,0*	
0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,05	0,0406	0,4810	0,0119	1,0022	-0,0489	1,0666
0,10	0,0382	0,4515	-0,0016	1,0311	-0,0036	1,2468
0,15	0,0025	0,4488	-0,0023	1,0603	-0,0024	1,3994
0,20	0,0016	0,4484	-0,0024	1,2126	-0,0019	1,5511
0,25	0,0009	0,4483	-0,0025	1,3648	-0,0018	1,7028
0,30	0,0003	0,4482	-0,0026	1,5171	-0,0018	1,8544
0,35	0,0002	0,4481	-0,0027	1,6604	-0,0017	2,0006
0,40	0,0001	0,4480	-0,0027	1,7320	-0,0017	2,0071

Висновки

1. Дослідження розв’язків задачі (18) показує, що поведінка полів потенціалів переносу θ_1 й θ_2 у значній мірі залежить від величини коефіцієнта *m* у функції $M(\theta_1)$. Ця функція визначає нелінійні властивості задачі й характеризує залежність коефіцієнту теплопровідності матеріалу від температури. Так, при $m\leq 1$ як для температурного поля, так і для поля потенціалу масопереносу спостерігається яскраво виражена динаміка у початковій фазі переносу, яка призводить до швидкої стабілізації у часі. Найбільші зміни полів цих потенціалів відбуваються при значеннях F_0 у проміжку від 0 до 0,2. При $F_0>$ 0,2 рух полів θ_1 й θ_2 у часі стрімко сповільнюється.

2. Для значень коефіцієнту $m>1$ характер взаємозв’язаного переносу змінюється. Для потенціалу θ_1 часовий діапазон нестаціонарності процесу починає скорочуватись, що призводить до інтенсифікації перенесення тепла. Проміжок значень критерію F_0, у котрому мають місце найбільш суттєві зміни поля θ_2, зі збільшенням *m* розширюється, що призводить до сповільнення процесу масопереносу.

3. У області найбільшої нестаціонарності процесу при малих значеннях *m* ($m<0{,}5$) у одних і тих самих точках провідного середовища швидкість зміни температурного поля не перевищує швидкості

зміни поля масового вмісту. Зі збільшенням *m* $\dot{\theta}_1$ зростає, а $\dot{\theta}_2$ зменшується, й при *m*>0,5 має місце співвідношення $\dot{\theta}_1 > \dot{\theta}_2$.

Література

1. Лыков А.В. Теория переноса энергии и вещества./А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – Минск: Изд-во АН БССР, 1959. – 329 с.
2. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса. /А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
3. Лыков А.В. Теория сушки./А.В.Лыков. – М.:Энергия, 1968. – 471 с.
4. Михайлов Ю.А. Вариационные методы в теории нелинейного тепло- и массопереноса./Ю.А. Михайлов, Ю.Т. Глазунов – Рига: Зинатне, 1985. – 190 с.

УДК 693.61:69.059.25

Терновий В.І., Молодід О.С., Гуцуляк Р.Б.[1]

ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ РЕСТАВРАЦІЙНОЇ ЦЕМ'ЯНКОВОЇ ШТУКАТУРКИ

АНОТАЦІЯ. Зразки цем'янкової штукатурки за історичною рецептурою не мають необхідних фізико-механічних показників. Приведені дослідження залежності показників цем'янкової штукатурки від добавок метилцелюлози, суперпластифікатора та негашеного вапна взамін вапняного тіста в сукупності з введенням великої кількості води, а також від кількості цементу, яким замінили частину вапна.

Ключові слова: цем'янкова штукатурка, негашене вапно, фізико-механічні показники.

АННОТАЦИЯ. Образцы цемяночной штукатурки по исторической рецептуре не имеют необходимых физико-механических показателей. Приведенные исследования зависимости показателей цемянковои штукатурки от добавок метилцеллюлозы, суперпластификатора и негашеной извести взамен известкового теста в совокупности с введением большого количества воды, а также от количества цемента, которым заменили часть извести.

Ключевые слова: цемяночная штукатурка, негашеная известь, физико-механические показатели.

ANNOTATION. Samples tsemyankovoyi plaster on historical recipes do not have the necessary physical and mechanical properties. Cited research depends on indicators tsemyankovoyi plaster additives Methylcellulose, superplasticizer and quicklime return lime paste together with the introduction of large amounts of water and the amount of cement, which replaced part of the lime.

Keywords: tsemyankova plaster, quicklime, physical and mechanical performance.

Постановка проблеми. При реставрації визначних пам'яток архітектури Давньоруської доби (X-XIII ст.) реставратори стикаються з необхідністю відновлення вапняно-цем'янкових штукатурок, якими опоряджені ці пам'ятки. Згідно існуючих норм та правил реставраційний матеріал повинен бути сумісним з історичним, не завдавати йому шкоди, а найкраще – коли він буде однієї природи і складу з автентичним матеріалом. З іншої сторони реставрація підмурків, цокольної частини, галерей та інших ділянок пам'яток, які, як правило, систематично замокають, засолені і активно руйнуються, вимагає використання санувальних систем. Це означає, що реставраційна штукатурка повинна мати високу пористість, низький коефіцієнт опору дифузії водяної пари, низьку капілярну проникність, високу солестійкість, достатню міцність і інші властивості сформульовані в міжнародних технічних нормах WTA [1].

Дослідження складу реставраційної цем'янкової штукатурки та технології її влаштування до цього часу не проводились.

Зразки цем'янкової штукатурки виготовлені нами за історичною рецептурою мали фізико-механічні показники, що не задовольняли вимоги, крім пористості та коефіцієнта опору дифузії водяної пари [2]. Міцність на стиск таких зразків нижча від міцності історичних зразків у 9 разів. За-

[1] Терновий В.І., к.т.н., проф. (КНУБА, Київ); Молодід О.С., інженер (КНУБА, Київ); Гуцуляк Р.Б., к.хім.н., директор (ДП «Конрест», Київ).