

УДК 621.742.486

Л. І. Солоненко¹, С. І. Реп'ях¹, К. І. Узлов¹¹ Національна металургійна академія України

ВИПАРОВУВАННЯ МАЛИХ МАС ВОДИ ПРИ ЇХ ОБЕРТАННІ В ОБЛАСТІ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ МІКРОХВИЛЬНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Вперше досліджено та встановлено час тривалості нагрівання та випаровування малих парних наважок води, розташованих на краю і в центрі обертового столу мікрохвильової печі, від їх вихідної маси. Визначено, що для реалізації процесу структурування піщано-рідкоскляних сумішей за способом паро-мікрохвильового затвердіння використання наважок води (водяних зарядів) в резонаторі мікрохвильової печі більше 3 г недоцільно. Це зумовлено тим, що подальше збільшення маси наважок призводить до збільшення тривалості нагрівання та випаровування води з неї. При збільшенні маси води у наважок, що розташовані у центрі обертового столу, тривалість її випаровування мало залежить від маси наважок, розташованих на краю обертового столу. При цьому тривалість нагріву і випаровування води з парних наважок малої маси, розташованих як у центрі, так і на краю, зростає зі збільшенням їх маси. Отримані дані будуть корисні для розробки технології структурування формувальних та стрижневих піщано-рідкоскляних сумішей за способом паро-мікрохвильового затвердіння.

DOI: 10.34185/0543-5749.2021-1-57-67

Вступ

В сучасних технологіях виробництва та обробки діелектричних матеріалів поряд з передачею тепла шляхом конвекції, теплопровідності або випромінювання широко використовують і їх діелектричний нагрів у полі мікрохвильового випромінювання (МВ) [1..5]. На відміну від зазначених методів нагрівання тіл та матеріалів МВ характеризується [6, 7]:

- об'ємністю та високою швидкістю підвищення температури;
- безінерційним характером нагріву;
- збігом у часі та просторі напрямків векторів вологості та температури в капілярно-пористих тілах;
- селективністю (вибірністю, адресністю) нагріву;
- відносно низькими енергетичними втратами;
- залежністю глибини проникнення МВ в матеріали, що нагріваються, від його природи і вмісту в ньому води (води), частоти МВ та діелектричної проникності матеріалу, що нагріваються;

- залежністю швидкості нагрівання різних частин тіла, що нагріваються, від розмірно-конфігураційних факторів, як самого тіла, так і робочого простору мікрохвильової печі (МП).

Всі мікрохвильові печі за характером передачі енергії поділяють на установки з електромагнітною хвилею, що біжить або стоїть, а також електромагнітним променем у вільному просторі. У всіх МП побутового призначення та в ряді промислових МП реалізовано принцип нагріву в електромагнітній стоячій хвилі.

Електромагнітна стояча хвиля характерна для хвильового процесу, що проходить у розподілених коливальних системах. Такі коливальні системи мають характерне стійке в просторі розташування енергетично активних і пасивних зон – максимумів (пучностей), що чергуються, і мінімумів (вузлів) амплітуди хвилі. З цієї причини нагрівання тіл у таких МП має нерівномірний характер, а тривала робота таких печей без нагрівального матеріалу в їхній робочій камері неприпустима [6].

Електромагнітні хвилі в такій камері, багаторазово відбиваючись від її стінок і тіл, що на-

гриваються, загасають, формуючи численні плоскі стоячі хвилі з областями вузлів і пучностей. Діелектричний матеріал, що знаходиться в такій камері, нагріваючись, випаровуючись або розплавляючись, частково поглинає мікрохвильову енергію. Часткове, змінне в часі поглинання енергії матеріалом діелектриком у сукупності з його примусовим переміщенням та/або циклічною зміною напрямку поширення хвиль усередині робочої камери призводять до безперервної зміни розташування (дрейфу) зон вузлів, пучностей та їх потужності. При цьому з моменту збудження МВ потужність в його пучності збільшується доти, поки потужність МВ, що поглинається діелектриком, не стане рівною потужності МВ на виході з хвилеводу в камеру печі [8, 9].

У загальному випадку, коли тіла, що нагріваються, не відчувають фазових перетворень швидкість нагріву (тривалість нагріву до заданої температури) кожного конкретного тіла в робочому просторі МП залежить від потужності її магнетрона, маси, теплоємності і величини діелектричної проникності матеріалу даного тіла. Тобто, тривалість нагріву тіла (А), що не зазнає фазових перетворень та безвідносно інших тіл, розраховують за формулою [10, 11]:

$$\tau_A = \frac{Q_A}{P_M} = \frac{c_{pA} \cdot m_A (t_2 - t_1)}{P_M} = \frac{c_{pA} \cdot m_A \cdot \Delta t_A}{P_M}, \quad (1)$$

$P_M = \zeta \cdot P_{MG}$,

де Q_A – кількість енергії, що витрачається для підвищення початкової температури тіла А на величину Δt_A , Дж; P_M – потужність МВ в печі, Вт; c_{pA} – питома теплоємність тіла А, що нагрівається, Дж/(кг·°С); m_A – маса тіла А, що нагрівається, кг; t_1, t_2 – відповідно, початкова та кінцева температура тіла А, що нагрівається протягом часу τ , °С; τ_A – час нагрівання тіла А мікрохвильовим випромінюванням, с; ζ – коефіцієнт корисної дії магнетрону ($\zeta \cong 0,65$); P_{MG} – потужність магнетрону печі, Вт.

Тривалість проходження фазового переходу (випаровування, плавлення) матеріалу під дією МВ розраховують за формулою [12]:

$$\tau_A^* = \frac{Q_A^*}{P_M} = \frac{L_A \cdot m_A}{P_M}, \quad (2)$$

де Q_A^* – кількість енергії, що витрачається для випаровування тіла А масою m_A , Дж; L_A – пито-

ма теплота випаровування тіла А, Дж/кг.

Для визначення тривалості нагрівання та випаровування тіла (наприклад, води) формули (1) і (2) складають:

$$\tau = \tau_A + \tau_A^* = \frac{c_{pA} \cdot m_A \cdot \Delta t_A}{P_M} + \frac{L_A \cdot m_A}{P_M} = \frac{(c_{pA} \cdot \Delta t_A + L_A) m_A}{P_M}. \quad (3)$$

де τ_A – час нагрівання наважки води мікрохвильовим випромінюванням, с; τ_A^* – час випаровування наважки води під дією МВ, с; c_{pA} – питома теплоємність води, Дж/(кг·°С); m_A – маса наважки води, кг; Δt_A – різниця між кінцевою і початковою температурою води, що нагрівається протягом часу τ , °С; L_A – питома теплота випаровування води, Дж/кг; P_M – номінальна потужність магнетрона МП, Вт.

З формули (3) випливає, що при постійній масі тіла (матеріалу, речовини) тривалість його нагрівання і фазового перетворення в МВ не залежить від розмірів, форми і числа частин (наважок) цього тіла, його розташування в робочому просторі МП [12]. Проте, експериментальні дані щодо нагрівання тіл в області стоячих хвиль мікрохвильового випромінювання на столі, що обертається, резонатора часто не збігаються з теоретичними результатами. Ця обставина значно знижує точність прогнозування результатів, наприклад, структурування формувальних та стрижневих сумішей у паромікрохвильовому середовищі і, відповідно, вимагає подальшого дослідження.

Постановка проблеми

Багатоваріантність реалізації способу паромікрохвильового затвердіння (ПМЗ-процес) формувальних і стрижневих сумішей передбачає використання в резонаторі мікрохвильової печі не тільки одного, а й кількох водяних зарядів (навісок води масою до 600 г), які можуть бути розташовані поблизу вісі обертового столу резонатора, так і на його краю. На даний час відомі дані [13] тривалості випаровування води з наважок рівновіддалених від центру обертового столу в резонаторі мікрохвильової печі, але не відомий час випаровування з наважок води розташованих у центрі обертового столу, а також попарних наважок розташованих у центрі та на краю обертового столу. Тому, яка робота спрямована на встановлення закономірностей впли-

ву тривалість нагріву та випаровування, а також масової швидкості випаровування води з одиночних та парних наважок масою до 600 г у центрі та рівновіддалених від центру обертання столу МП є актуальною.

Завдання досліджень

Встановити закономірність нагріву та випаровування наважок води, визначити масову швидкість випаровування води, під дією мікрохвильового випромінювання, та масу наважок (водяних зарядів) які можливо використовувати для структурування сумішей в паро-мікрохвильовому середовищі.

Мета роботи – дослідити швидкість нагріву та випаровування води з одиночних та парних наважок води масою до 600 г в залежності

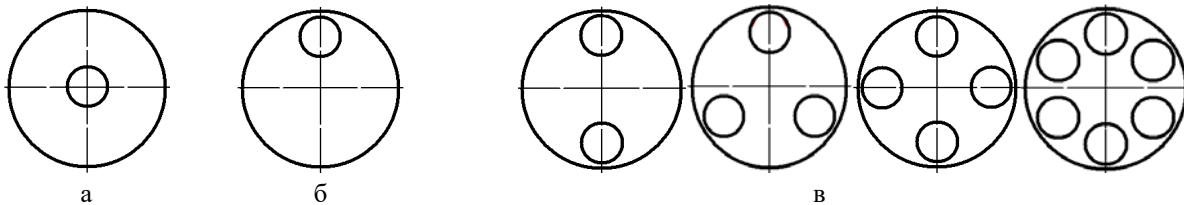


Рис. 1. Схеми розміщення одиночних наважок води у центрі (а) та на краю (б), а також парних наважок води (в) рівновіддалених від центру обертового столу МП

Визначення впливу маси, кількості і місця положення наважок води на тривалість її випаровування проводили з використанням картонних стаканів, які наповнювали різною (за масою) кількістю води і встановлювали на обертовий стіл МП відповідно схеми на рис. 1.

Зміну маси наважок фіксували шляхом їх зважування через кожні 1...4 хв обробки МВ на електронних вагах з точністю 0,01 г. Час фіксували з точністю 1 с.

Результати досліджень

З метою визначення тривалості нагріву та випаровування води з одиночних наважок підготовлені наважки води масою до 600 г встановлювали у центрі та рівновіддалені від центру обертання столу МП. Результати вимірювань сумарного часу нагріву та випаровування води в наважках, що були розташовані в центрі (τ_0) та на відстані 90 мм від центру обертового столу (τ_{90}), а також розрахункові значення середньої масової швидкості випаровування води з наважок (W) представлені в табл. 1.

За експериментальними даними (див. табл. 1) і теоретично розрахованими даними за фо-

від їх числа, маси та розміщення на обертовому столі мікрохвильової печі.

Об'єкт і методи досліджень

Об'єкт дослідження – наважки води, що нагріваються під дією мікрохвильового випромінювання.

Обробку наважок мікрохвильовим випромінюванням проводили в печі з об'ємом робочої камери 32 літрів, з номінальною потужністю магнетрону 900 Вт, частотою мікрохвильового випромінювання 2,45 ГГц.

Маса наважок води дорівнювала 20, 50, 100, 200, 300, 400, 600 г. Наважки води встановлювали як у центр, так і рівновіддалено від центру обертового столу МП, що схематично представлено на рис. 1.

рмулою (3) побудували залежності тривалості нагріву і випаровування, а так само середньої масової швидкості випаровування наважок води від її початкової маси в наважках, які представлені на рис. 2.

Результати аналізу ходу залежностей на рис. 2 показує, що:

- тривалість нагріву та випаровування води з наважок з початковою масою до 600 г більше, а середня масова швидкість випаровування води менше у наважок, розташованих на краю столу МП, ніж у наважок, розташованих в центрі столу;

- тривалість нагріву та випаровування води з наважок з початковою масою до 600 г і середня масова швидкість випаровування води з наважок неухильно зростає зі збільшенням її початкової маси;

- з підвищенням початкової маси наважки до 0,2 кг темп досліджуваних параметрів істотно більший, ніж у наважок з початковою масою більше 0,2 кг;

- у наважок з початковою масою понад 0,2 кг рівень досліджуваних показників стають практично однаковими, а середня масова швид-

кiсть випаровування води з них iз збiльшенням iхньої початкової маси практично не змiнюється;
 - у наважок з початковою масою до 0,2 кг, розташованих у центрі столу МП тривалiсть

нагрiву та випаровування води iстотно менша, а масова швидкiсть випаровування значно бiльша, нiж у подiбних наважок, розташованих на краю столу.

Таблиця 1. Експериментальнi значення тривалостi нагрiву та випаровування води, а також середньої масової швидкостi випаровування води з наважок

Маса наважки, кг	0,02	0,05	0,10	0,2	0,3	0,4	0,6
Схема розташування наважок води на обертовому столі МП							
τ_0 , с	232	392	568	1067	1417	1859	2788
W , г/хв	5,17	7,65	10,56	11,25	12,70	12,91	12,91
Маса наважки, кг	0,02	0,05	0,10	0,2	0,3	0,4	0,6
Схема розташування наважок води на обертовому столі МП							
τ_{90} , с	734	894	960	1170	1500	1940	2900
W , г/хв	1,63	3,36	6,25	10,26	12,00	12,37	12,41

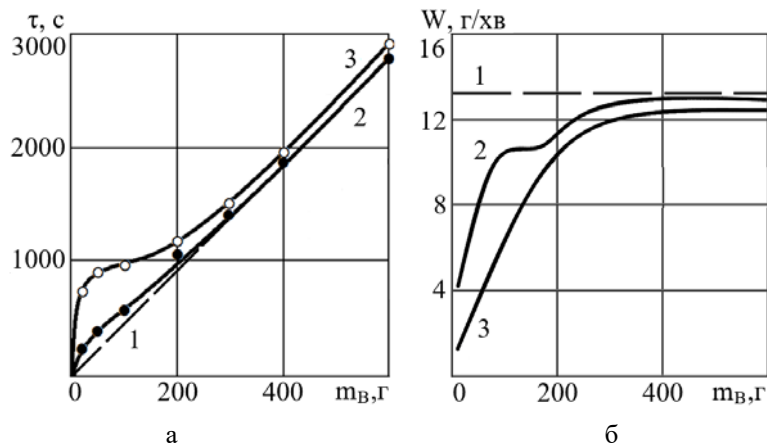


Рис. 2. Залежнiсть тривалостi нагрiву та випаровування (а), середньої масової швидкостi випаровування (б) наважок води масою до 600 г вiд iх початкової маси: 1 – теоретична залежнiсть, що розрахована за формулою (3); 2 – експериментальна залежнiсть для наважок в центрі столу МП; 3 – експериментальна залежнiсть для наважок на краю столу МП

Данi закономірностi пояснюються тим, що у формулі (3) в знаменнику застосовується потужнiсть магнетрону МП, чим вища потужнiсть печi, тим менша тривалiсть нагрiвання та випаровування наважок води. Проте, як впливає з роботи [14] реальна потужнiсть МВ в центральній областi МП становить $\zeta = 40...72\%$ номiнальної потужностi iх магнетронiв. З вiддаленням вiд осi обертання столу реальна потужнiсть МВ рiзко знижується i на вiдстанi бiльше ~ 60 мм становить $\zeta = 29...36\%$ номiнальної потужностi iх магнетронiв, що пояснюється розподiлом i параметрами стоячих хвиль у робочій камері використуваних моделей МП. Тобто теоретичнi та

експериментальнi данi не можуть збiгатися з урахуванням втрати потужностi при нагрiванні, яка витрачається на нагрiвання всього робочого простору камери МП, включаючи iх матерiали i робочий стiл МП, що обертається, а також емностi, в якій знаходиться наважки води.

Локальне зниження швидкостi випаровування води в iнтервалi маси наважок 100...180 г, що розташованi в центрі обертового столу очевидно пов'язане з особливостями використаної методики дослiдженiв та зумовлено насиченням водяною парою простору резонатору МП.

Зi збiльшенням маси наважки води до 600 г як одиночної, так i парних, швидкiсть нагрiван-

ня і випаровування води сягає 12,4...12,9 г/хв, що зумовлює ПМЗ-процес на тривалі структурування суміші. За такий тривалий час обробки МВ температура частинок кварцового піску підвищиться до 100 °С і більше, що призведе до неможливості конденсації води на них і, відповідно, неможливості проходження процесу їх структурування.

Для області малих мас (до 10 г) наважок води залежності на рис. 2 були екстрапольовані та на їх основі побудовано аналогічні залежності, які представлені на рис. 3.

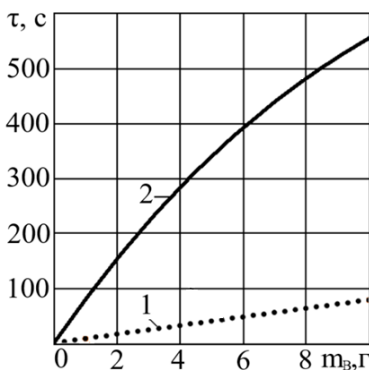


Рис. 3. Залежність тривалості нагріву та випаровування наважок води масою до 10 г від її вихідної маси та положення на обертовому столі МП: 1 – в центрі обертового столу МП; 2 – на краю обертового столу МП

В результаті математичної обробки екстраполяційної та використання теоретичної залежності Джоуля-Ленца (3) отримана наступна формула:

$$\tau = \frac{Z \cdot (c_A \cdot \Delta t_A + L_A)}{P_{MG}}, \quad (4)$$

де Z – поправочний коефіцієнт, наведений у табл. 2.

При математичній обробці прийняли середню питому теплоємність води в інтервалі температур від 20 до 100 °С рівною $c_A = 4180$ Дж/(кг·град), питому теплоту випаровування $L_A = 2258000$ Дж/кг, $\Delta t_A = 80$ °С та потужність магнетрону –900 Вт. В цьому випадку:

$$c_A \cdot \Delta t_A + L_A = 4180 \cdot 80 + 2258000 = 2592400 \text{ Дж/кг.}$$

Результати перевірки адекватності формули (4) і відносні величини розбіжностей між експериментальними та розрахунковими значеннями (розрахунок за формулою 3) тривалості нагріву та випаровування води з одиночних наважок масою до 10 г наведені в табл. 3.

Аналіз даних табл. 3 показує, що похибка (розбіжність) між розрахунковими та експериментальними значеннями тривалості нагріву та випаровування води з наважок масою до 10 г не перевищує 12 %, що дозволяє авторам рекомендувати формулу (4) для проведення відповідних інженерних розрахунків.

Результати експериментального та теоретичного визначення тривалості нагрівання та випаровування води з парних наважок масою до 10 г наведені в табл. 4.

Розрахунок виконували за формулою (4) і значення поправочних коефіцієнтів Z , наведеним у табл. 5.

Таблиця 2. Коефіцієнт Z для однієї наважки води, що нагрівається в МП

Число наважок, що одночасно нагрівають	Розташування на столі МП	Z
	1	в центрі
на краю		$25,7946 \cdot (m_B - 25,3m_B^2)$

Примітка: m_B – маса води у наважці, кг

Таблиця 3. Експериментальні та розрахункові значення тривалості нагрівання та випаровування води з наважок масою до 10 г

Розташування наважок на столі МП	Маса води в наважці, г	1	2	3	5	7	10
В центрі	τ, с (експ.)	9	15	23	41	56	77
	τ, с (розн.)	8,1	16,1	24,1	39,9	55,5	78,6
	Похибка, %	10,3	-7,4	-4,7	2,7	0,9	-2,0
На краю	τ, с (експ.)	65	135	220	320	430	545
	τ, с (розн.)	72,4	141	215	324	428	555
	Похибка, %	-11,4	-4,5	2,3	-1,4	0,5	-1,8

Таблиця 4. Експериментальні та теоретичні значення тривалості нагрівання та випаровування води з парних наважок масою до 10 г

п/п	m _ц , г	m _к , г	Час нагріву та випаровування води, с				Відмінності між розрахунковими та експериментальними значеннями, %	
			в центрі		на краю		центр	край
			експ.	розр.	експ.	розр.		
1	5	5	135	133	188	175	1,6	6,8
2	8	8	212	228	230	244	-7,6	-6,2
3	10	10	305	295	273	287	3,3	-5,0
4	10	7	261	268	211	232	-2,8	-9,8
5	10	5	245	245	194	193	0,0	0,3
6	10	3	225	214	167	153	4,7	8,1
7	2	10	66	71	278	255	-7,5	8,3
8	3	10	95	102	270	261	-6,9	3,4
9	5	10	177	160	277	270	9,8	2,5
10	7	10	200	215	300	277	-7,5	7,5
11	6	2	128	122	126	117	4,3	6,9
12	6	4	153	147	144	159	3,8	-10,6
13	3	7	90	92	189	205	-2,7	-8,2
14	7	3	153	156	131	143	-2,2	-9,0

Примітка: m_ц, m_к – маса води в наважках, що розташовані в центрі та на краю робочого столу МП відповідно, кг

Таблиця 5. Коефіцієнт Z у формулі (4) для двох наважок води, що одночасно нагрівають в МП

Число наважок, що одночасно нагрівають	Розташування на столі МП	Z
2	в центрі	$20,4 \cdot m_{ц}^{0,885} \cdot m_{к}^{0,265}$
	на краю	$0,18 \cdot (m_{ц}^{0,412} + 17,22m_{к}^{0,824})$

Аналіз величини відхилень значень (див. табл. 4) розрахункових та експериментальних даних показує, що отримані значення Z при збереженні загальної структури формули (3) дозволяють розраховувати тривалість нагрівання та випаровування води з парних наважок з похибкою не більше 10%, що можна порівняти з величинами відхилень цього параметра.

Використовуючи отримані розрахункові формули, розраховували залежності тривалості нагріву і випаровування наважок води, розташованих на краю і в центрі обертового столу МП від їх вихідної маси. Результати розрахунків наведено на рис. 4.

Аналіз перебігу залежностей на рис. 4 показує, що тривалість нагріву та випаровування води з парних наважок малої маси, розташованих як у центрі (радіус видалення навішування від осі обертання столу МП до 30 мм), так і на краю (радіус видалення навішування від осі обертання столу МП більше 30 мм), зростає зі збільшенням їхньої маси. При цьому тривалість нагріву та випаровування води з наважок на краю збільшується монотонно і в основному залежить від її маси (див. рис. 4, а). У той же

час, підвищення маси наважки, що розташовується в центрі обертового столу (див. рис. 4, б), і до ~3 г маси наважки, що розташовується на краю, призводить до різкого зростання тривалості її нагріву і випаровування. Подальше підвищення мас парних наважок (більше 4 г) призводить до монотонного збільшення тривалості цього часу.

Слід зазначити, що при збільшенні маси води в наважці, яка знаходиться в центрі, тривалість її випаровування мало залежить від маси наважки, розташованої на краю столу, про що свідчать залежності на рис. 5 а, б. Після досягнення маси наважки на краю 5 г тривалості нагрівання і випаровування з наважки в різних областях стають рівними. Подальше збільшення маси наважки на краю до 11 г призводить до повторної інверсії у співвідношенні тривалості нагріву та випаровування з парних наважок (див. рис. 5, в).

Причиною виникнення явища подвійної інверсії тривалості нагрівання та випаровування води з наважок, мабуть, є неадекватність взаємного впливу парних наважок малої маси. Як результат – це призводить не тільки до відмін-

ності в інтенсивності нагрівання та випаровування води з них, але й до розбіжностей

напрямів векторів ходу даного процесу (див. рис. 5).

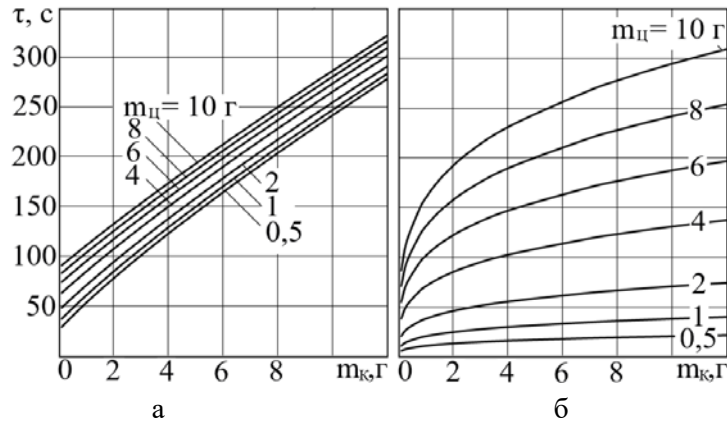


Рис. 4. Залежності тривалості нагрівання та випаровування наважок води, розташованих на краю (а) та в центрі (б) обертового столу МП від їх вихідної маси

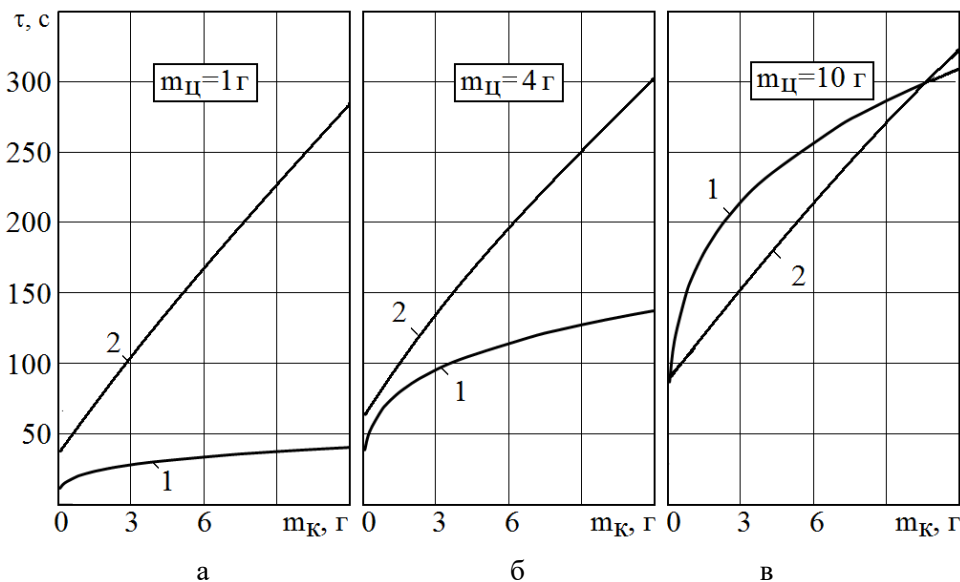


Рис. 5. Залежності тривалості нагрівання та випаровування наважок води, розташованих у центрі (1) і на краю (2) і столу МП, що обертається, від їх вихідної маси, що дорівнює 1 (а), 4 (б) та 10 г (в)

Висновки і перспективи досліджень

Встановлено, що для реалізації процесу структурування піщано-рідкоскляних сумішей за способом паро-мікрохвильового затвердіння використання наважок води (водяних зарядів) в резонаторі МП більше 3 г недоцільно. Це зумовлено тим, що подальше збільшення маси наважок призводить до збільшення тривалості нагрівання та випаровування води з неї. При збільшенні маси води у наважок, що розташовані у центрі обертового столу, тривалість її випаровування мало залежить від маси наважок, розташованих на краю обертового столу. При цьому

тривалість нагріву і випаровування води з парних наважок малої маси, розташованих як у центрі, так і на краю, зростає зі збільшенням їх маси.

Врахування встановлених закономірностей при розробці технології структурування піщано-рідкоскляних сумішей за способом паро-мікрохвильового затвердіння дозволить не тільки скоротити час відпрацювання технології форм та стрижнів, але і підвищити їх якість та властивості. Виходячи з викладеного перспективою даної роботи є дослідження впливу на процес випаровування води з наважок при наяв-

ності в резонаторі МП тіл різної маси та величини діелектричної проникності, що відповідає умовам використання у даному процесі відповідного модельно-стрижневого оснащення.

Література

1. Ушакова Н. Ф., Копылова Т. С., Касаткин В. В. Опыт применения СВЧ-энергии при производстве пищевых продуктов. *Пищевая промышленность*. 2013. № 10. С. 30-32.

2. Рушиц А. А., Щербакова Е. И. Применение СВЧ-нагрева в пищевой промышленности и общественном питании. *Вестник ЮУрГУ «Пищевые биотехнологии»*. 2014. Т. 2. №1. С. 9-15.

3. Данилов О. С., Михеев В. А., Москаленко Т. В. Микроволновая обработка твердых горючих ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010. №3. С. 203-208.

4. Кисурин И. В., Арапов К. А., Гушин П. А. Перспективы использования микроволнового излучения в процессе переработки целлюлозосодержащего сырья. *Химический журнал*. 2010. Т. 17. № 3. С. 167-170.

5. Маркин В. И., Чепрасова М. Ю., Базарнова Н. Г. Основные направления использования микроволнового излучения при переработки растительного сырья (обзор). *Химия растительного сырья*. 2014. №4. С. 21-42.

6. Кардашев Г. А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. М.: Химия, 1990. 208 с.

7. Гюльмалиев Э. А., Третьяков В. Ф., Талышинский Р. М. Химические аспекты развития технологии СВЧ. История и педагогика естествознания. 2015. №2. С. 59-68.

8. Bykov Yu. V., Rybakov K. I., Semenov V. E. High-temperature microwave processing of materials. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2001. Vol. 34. P. 55-75.

9. Стрельцов О. Б. Совершенствование СВЧ техники и технологии направленного изменения структуры и свойств полимерных материалов: дис. канд. тех. наук: 07.00.10. Уфа, 2018. 146 с.

10. Романов В. В., Прохорова А. И., Копылова О. А. Экспериментальное исследование теплообмена при испарении капли воды с теплонапряженной поверхности. *Молодой ученый*. 2016. №20. С. 185-188.

11. Боришанский В. М. Теплопередачи и жидкости, свободно растекающейся по поверхности, нагретой выше температуры кипения. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1953. 350 с.

12. Билько М. И., Томашевский А. К., Шаров П. П. Изменение мощности на СВЧ. М.: Советское радио, 1976. 168 с.

13. Солоненко Л. И. Некоторые особенности сушки литейных форм и стержней в области стоячих волн сверхвысокочастотного излучения. *Металл и литье Украины*. 2020. №1. С. 69-78.

14. Солоненко Л. И., Репях С. И. Оценка реального уровня мощности СВЧ-излучения в рабочей камере СВЧ-печи. *The 1st International scientific and practical conference "Priority directions of science development"* (October 28-29, 2019, Lviv, Ukraine). С. 122-125.

Reference

1. Ushakova, N. F., Kopylova, T. S., Kasatkin, V. V. (2013). Experience in the use of microwave energy in food production. *Food industry*, (10), 30-32

2. Ruschits, A. A., Shcherbakova, E. I. (2014). The use of microwave heating in the food industry and public catering. *Bulletin of SUSU "Food Biotechnology"*, 2(1), 9-15

3. Danilov, O. S., Mikheev, V. A., Moskalenko, T. V. (2010). Microwave processing of solid fossil fuels. *Mountain information and analytical bulletin*, (3), 203-208

4. Kisurin, I. V., Arapov, K. A., Gushchin, P. A. (2010). Prospects for the use of microwave radiation in the processing of cellulose-containing raw materials. *Chemical journal*, 17 (3), 167-170

5. Markin, V. I., Cheprasova, M. Yu., Bazarnova, N. G. (2014). The main directions of the use of microwave radiation in the processing of plant materials (review). *Chemistry of plant raw materials*, (4), 21-42

6. Kardashev, G. A. (1990). Physical methods of intensification of chemical technology processes. Moscow: Chemistry

7. Gulmaliev, E. A., Tretyakov, V. F., Talyshinsky, R. M. (2015). Chemical aspects of the development of microwave technology. *History and pedagogy of natural science*, (2), 59-68

8. Bykov, Yu. V., Rybakov, K. I., Semenov, V. E. (2001). High-temperature microwave processing of materials, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, (34), 55-75

9. Streltsov, O. B. (2018). Improvement of microwave technology and technology of directed changes in the structure and properties of polymeric materials: dis. Cand. those. Sciences: 07.00.10. Ufa

10. Romanov, V. V., Prokhorova, A. I., Kopylova, O. A.

lova, O. A. (2016). Experimental study of heat transfer during evaporation of a water drop from a heat-stressed surface. *Young scientist*, (20), 185-188

11. Borishansky, V. M. (1953). Heat transfer and liquid flowing freely over the surface heated above the boiling point. M.-L.: Gosenergoizdat

12. Bilko, M. I., Tomashevsky, A. K., Sharov, P. P. (1976). Changing the microwave power. Moscow: Soviet radio

13. Solonenko, L. I. (2020). Some features of drying of casting molds and cores in the area of standing waves of microwave radiation. *Metal and casting of Ukraine*, (1), 69-78

14. Solonenko, L. I., Repyakh, S. I. (2019). Assessment of the real power level of microwave radiation in the working chamber of the microwave oven. *The 1st International scientific and practical conference "Priority directions of science development"* (October 28-29, Lviv, Ukraine), 122-125

Солоненко Людмила Ігорівна, доцент, кандидат технічних наук, докторант кафедри ливарного виробництва, Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна. ORCID ID: 0000-0003-2092-8044. E-mail: solonenkoli14@gmail.com

Реп'ях Сергій Іванович, старший дослідник, доктор технічних наук, професор кафедри ливарного виробництва, Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна. ORCID ID: 0000-0003-0203-4135. E-mail: 123rs@ua.fm

Узлов Костянтин Іванович, професор, доктор технічних наук, професор кафедри матеріалознавства та термообробки, Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна. ORCID ID: 0000-0003-0744-9890. E-mail: konst.uzlov@gmail.com

ВИПАРОВУВАННЯ МАЛИХ МАС ВОДИ ПРИ ЇХ ОБЕРТАННІ В ОБЛАСТІ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Мета роботи – дослідити швидкість нагріву та випаровування води з одиночних та парних наважок води масою до 600 г в залежності від їх числа, маси та розміщення на обертовому столі мікрохвильової печі.

Методика. Визначення впливу маси, кількості і місця положення наважок води на тривалість її випаровування проводили з використанням картонних стаканів, які встановлювали у центрі та рівно-віддалено від центру обертання робочого столу мікрохвильової печі. Зміну маси наважок під час їх обробки мікрохвильовим випромінюванням проводили шляхом їх зважування через кожні 1...4 хв обробки. Обробку наважок мікрохвильовим випромінюванням проводили в печі з об'ємом робочої камери 32 літри, з номінальною потужністю магнетрону 900 Вт, частотою мікрохвильового випромінювання 2,45 ГГц.

Результати. Встановлено, що для реалізації процесу структурування піщано-рідкоскляних сумішей за способом паро-мікрохвильового затвердіння використання наважок води (водяних зарядів) в резонаторі мікрохвильової печі більше 3 г недоцільно. Це зумовлено тим, що подальше збільшення маси наважок призводить до збільшення тривалості нагрівання та випаровування води з неї. При збільшенні маси води у наважок, що розташовані у центрі обертового столу, тривалість її випаровування мало залежить від маси наважок, розташованих на краю обертового столу. При цьому тривалість нагріву і випаровування води з парних наважок малої маси, розташованих як у центрі, так і на краю, зростає зі збільшенням їх маси.

Наукова новизна. Вперше досліджено та встановлено час тривалості нагрівання та випаровування малих парних наважок води, розташованих на краю і в центрі обертового столу мікрохвильової печі, від їх вихідної маси.

Практична цінність. Отримані дані будуть корисні для розробки технології структурування формувальних та стрижневих піщано-рідкоскляних сумішей за способом паро-мікрохвильового затвердіння.

Ключові слова: наважка, вода, випаровування, мікрохвильове випромінювання, мікрохвильова піч, паро-мікрохвильове затвердіння.

Lyudmyla Solonenko, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Doctoral Student of the Department of Foundry Production, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine. ORCID ID: 0000-0003-2092-8044. Email: solonenkoli14@gmail.com

Serhiy Repyah, Senior Researcher, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Foundry Production, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine. ORCID ID: 0000-0003-0203-4135. Email: 123rs@ua.fm

Kostiantyn Uzlov, Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine. ORCID ID: 0000-0003-0744-9890. Email: konst.uzlov@gmail.com

WATER SMALL MASSES EVAPORATION DURING ROTATION IN MICROWAVE RADIATION STANDING WAVES FIELD

Purpose has been to investigate the rate of water heating and evaporation from single and paired aqueous portions weighing up to 600 g depending on their number, mass and placement on microwave furnace rotating table.

Methods. Water samples mass, quantity and location influence determination on its evaporation duration has been performed using cardboard cups, which have been installed in the center and equidistant from microwave furnace rotation center. Test portions mass changing during their microwave radiation treatment has been performed by weighing them every 1...4 minutes of treatment. Test portions microwave radiation treatment has been performed in furnace with working chamber volume of 32 liters, with nominal magnetron power of 900 W, and microwave radiation frequency of 2.45 GHz.

Results. It has been established that, for process realization of sand-sodium-silicate mixtures structuring by steam-microwave solidification method, water portions (water charges) in microwave furnace resonator using more than 3 g is inexpedient. This is due to the fact that mass of portions further increasing leads to heating and water evaporation from it durations increasing. At water mass of test portions located in rotating table center increasing, its evaporation duration depends a little on mass of portions located on rotating table edge. At the same time, heating and water evaporation from paired low mass test portions, located both in the center and at the edge, durations increase with mass increasing.

Originality. For the first time, water small paired portions, located on the edge and in the center of microwave furnace rotating table, heating and evaporation durations dependence on their initial mass have been investigated and established.

Practical implications. Data obtained will be useful for molds and cores sand-sodium-silicate mixtures, structured by steam-microwave solidification method, technology development.

Key words: test portion, water, evaporation, microwave radiation, microwave furnace, steam-microwave solidification.

Солоненко Людмила Игоревна, доцент, кандидат технических наук, докторант кафедры литейного производства, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина. ORCID ID: 0000-0003-2092-8044. E-mail: solonenkoli14@gmail.com

Репях Сергей Иванович, старший исследователь, доктор технических наук, профессор кафедры литейного производства, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина. ORCID ID: 0000-0003-0203-4135. E-mail: 123rs@ru.fm

Узлов Константин Иванович, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина. ORCID ID: 0000-0003-0744-9890. E-mail: konst.uzlov@gmail.com

ИСПАРЕНИЕ МАЛЫХ МАСС ВОДЫ ПРИ ИХ ВРАЩЕНИИ В ОБЛАСТИ СТОЯЧИХ ВОЛН МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы – исследовать скорость нагрева и испарения воды из одиночных и парных навесок воды массой до 600 г в зависимости от их числа, массы и размещения на вращающемся столе микроволновой печи.

Методика. Определение влияния массы, количества и места положения навесок воды на продолжительность ее испарения проводили с использованием картонных стаканов, которые устанавливали в центре и равноудалено от центра вращения рабочего стола микроволновой печи. Изменение массы навесок при их обработке микроволновым излучением проводили путем их взвешивания через каждые 1...4 мин обработки. Обработку навесок микроволновым излучением проводили в печи с объемом рабочей камеры 32 литра, с номинальной мощностью магнетрона 900 Вт, частотой микроволнового излучения 2,45 ГГц.

Результаты. Установлено, что для реализации процесса структурирования песчано-жидкостекольных смесей по способу паро-микроволнового отверждения использование навесок воды (водяных зарядов) в резонаторе микроволновки более 3 г нецелесообразно. Это обусловлено тем, что дальнейшее увеличение массы навесок приводит к увеличению продолжительности нагрева и испарения воды из нее. При увеличении массы воды в навесках, расположенных в центре вращающегося стола, продолжительность ее испарения мало зависит от массы навесок, расположенных на краю вращающегося стола. При этом продолжительность нагрева и испарения воды из парных навесок малой массы, расположенных как в центре, так и на краю, возрастает с увеличением их массы.

Научная новизна. Впервые исследовано и установлено время продолжительности нагревания и испарения малых парных навесок воды, расположенных на краю и в центре вращающегося стола микроволновой печи, от их исходной массы.

Практическая ценность. Полученные данные будут полезны для разработки технологии структурирования формовочных и стержневых песчано-жидкостекольных смесей по способу паро-микроволнового отверждения.

Ключевые слова: навеска, вода, испарение, микроволновое излучение, микроволновая печь, паро-микроволновое отверждение.

Рукопис надійшов 13.03.2021 р.