

[0000-0001-9724-8640] **Т. Е. Римар**, *д-р техн. наук, доцент,*  
*професор кафедри хімічної інженерії та екології*  
e-mail: rymartanyana1975@gmail.com

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля  
вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, 01042, Україна

## ЗАСТОСУВАННЯ НВЧ УСТАНОВОК ДЛЯ СПУЧЕННЯ ЗЕРНИСТИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ РІДИННОГО СКЛА

*В роботі проводиться дослідження процесу отримання спучених зернистих матеріалів на основі рідинного скла під дією НВЧ випромінювання та порівняння його з процесом отримання цих матеріалів при традиційному конвективному нагріванні. Встановлено, що під дією НВЧ випромінювання за однакових температур з конвективним нагрівом вдвічі інтенсивніше відбувається спучення зернистого матеріалу. Так, при потужності 650 Вт ( $T = 115-120^{\circ}\text{C}$ ) коефіцієнт спучення досягає свого постійного значення 2,86 вже на 6-й хв процесу, тоді як при спученні зерен при конвективному нагріві за тієї самої температури найвище значення коефіцієнта спучення – 1,534 і досягається воно через 11 хв, що свідчить про складність спучення зерен за цих умов через перебіг конкуруючих процесів поризації та дегідратації. Прискорення процесу спучення і можливість його проведення за більш низьких температур пов'язані з тим, що під дією НВЧ випромінювання за рахунок збудження мікрохвильовим полем іонних потоків значно інтенсифікуються дифузійні процеси речовин з іонною провідністю, до яких відноситься рідинне скло. Для підтвердження ефективності використання НВЧ-установок було розраховано енергоспоживання і ККД установок та визначено, що ККД НВЧ установки майже вдвічі перевищує ККД сушарної установки. Наведено види промислових НВЧ-установок, в яких можна здійснити процес спучення рідинноскляних зерен.*

**Ключові слова:** *зернисті матеріали, рідинне скло, НВЧ випромінювання, конвективний нагрів, коефіцієнт спучення, коефіцієнт корисної дії.*

**Вступ.** Специфіка пористої структури (переважання закритої пористості зерен, наявність міжзернових порожнеч) сприяє забезпеченню не лише гарних теплотехнічних властивостей зернистих теплоізоляційних матеріалів (ТІМ), але й стабільності показників їх якості в цілому. Наявні дані про параметри їх якості свідчать про перспективність застосування зернистих ТІМ для виготовлення теплозахисних конструкцій.

У будівництві виготовляються і використовуються різноманітні штучні зернисті утеплювачі, як на основі природної сировини (перліту, вермікуліту, кремнезему), так і на основі силікатної сировини: алюмосилікатних матриць та рідинного скла, шляхом їх гранулювання з попереднім переведенням у гелеподібний стан за допомогою спеціальних добавок [1-9], які згодом спучують у різних теплових агрегатах – сушарних барабанах, тунельних печах і печах з киплячим шаром, вертикальних сушарних вібраційних установках тощо.

Найбільш інтенсивне спучення рідинноскляного бісеру відбувається в печах з киплячим шаром, проте при цьому із зерен інтенсивно видаляється волога, що негативно позначається на їх будівельно-експлуатаційних властивостях. Доцільніше використовувати для термообробки сирцевих гранул сушарні барабани, що обертаються. В них, за рахунок безперервної перевалки зерен у повітряному середовищі теплоносія, що подається, ефективніше здійснюється процес спучення бісеру [4], але сушарні барабани мають низьку продуктивність, а температура спучення зерен занадто висока.

Так, робота [5] присвячена розробці ресурсозберігаючої технології пористих зернистих матеріалів, що використовуються як заповнювачі пористих легких бетонів, з полімінеральних сировинних сумішей. У роботі встановлені закономірності термічного спучення склокристалічних гранул при використанні відходів магнітної сепарації скарново-магнетитових руд і буровугільних глин завдя-

ки наявності в них речовин, що виявляють термічну активність з виділенням газової фази. Розроблено склад формувальної суміші зі склобою, рідкого скла та багатокомпонентної добавки, що забезпечує поліпшення формувальних властивостей скломаси. Спінювання таких гранул відбувається за температури 750 °С.

Для отримання гранульованого матеріалу в роботі [6] запропоновані рідинноскляні суміші пластичної консистенції з переважанням алюмосилікатних мікросфер та золи-винесення. Розроблений гранульований матеріал отриманий випалом при температурі 250–350 °С.

В роботі [7] гранульований спінений матеріал отримують з вихідних матеріалів, що включають скляний порошок, рідинне скло, спінюючий агент і метакаолін. Композицію змішують для утворення гомогенної суспензії. Далі суспензію гранулюють з утворенням необроблених частинок гранульованого матеріалу, які спінюють при температурі випалу від 780 °С до 950 °С.

Пропонований у роботі [8] склад шихти для гранул включає як основний компонент лужне скло, а для модифікації властивостей вводять: як пластифікатор – легкоплавку глину, газифікатор – кокс та органічні добавки (тирса). Температура випалу сирцевих гранул становить 830–850 °С.

В роботі [9] розроблено сировинну суміш кремнеземвмісного техногенного компонента – золи-віднесення теплових електростанцій – і спосіб виготовлення водостійких пористих теплоізоляційних матеріалів, що містить як сполучний компонент розчинне скло та піноутворювач і регулятор швидкості твердіння сировинної суміші. Запропоновано низькотемпературну технологію спінювання в барабанній печі при температурі 350–600 °С.

У цій роботі процес термообробки і спучення рідинноскляних зерен пропонується проводити у мікрохвильовій (МХ) установці, в якій значно інтенсифікуються дифузійні процеси, що дозволяє їх проводити впродовж значно меншого часу термообробки та за більш низьких температур.

Перші розробки промислових НВЧ установок для термообробки матеріалів будівельних конструкцій почалися ще в кінці 1980-х років. При усій різноманітності НВЧ електротермічних установок і технологічних

процесів, що реалізуються в них, усі ці установки мають ту саму структуру. За необхідності НВЧ установки додатково оснащують роликвою транспортною системою. Модульні конструкції НВЧ печей призначені для сушіння дерева, кераміки, хімічних речовин, продуктів харчування, будівельних матеріалів, загартування армованого волокна (склопластика), для попереднього нагріву каучуку.

За допомогою мікрохвильового нагріву проводяться такі важливі фізико-хімічні процеси, як дегідратація, розкладання солей і гідроксидів, синтез багатокомпонентних сполук і спікання кераміки, при цьому часові й енергетичні витрати істотно нижчі, ніж при використанні традиційних методів здійснення цих процесів. Більш того, у низці випадків за рахунок мікрохвильового впливу можна домогтися результатів, яких не можна досягти за допомогою інших методів [10].

Мікрохвильова обробка має ряд переваг перед звичайними методами нагріву конденсованих середовищ (твердих тіл і рідин), до яких належать висока швидкість і низька інерційність нагріву, відсутність контакту тіла, що нагрівається, і нагрівача, однорідність нагріву матеріалу за усім об'ємом, можливість вибіркового нагріву компонентів суміші і високий коефіцієнт корисної дії (ККД). До того ж, НВЧ енергія не вносить забруднень при нагріві, при її використанні відсутні будь-які продукти згоряння. Генераторне обладнання повністю електронне і працює практично безінерційно, завдяки чому рівень потужності НВЧ і момент її подачі можна миттєво змінювати [11]. Отже, здійснення термоспучення рідинноскляних зерен за допомогою надвисокочастотних струмів замість традиційного конвективного нагріву є високopersпективним, а легкість, з якою НВЧ енергія перетворюється на тепло, дозволяє отримати дуже великі швидкості нагріву.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є порівняння процесів спучення рідинноскляних зерен в різних умовах – при мікрохвильовому нагріві і традиційному конвективному нагріві за однакових температур та визначення найбільш ефективного виду нагріву. Відповідно до поставленої мети були вирішені такі задачі дослідження: визначення коефіцієнта спучення рідинноскляних зерен впродовж часу термообробки та ККД сушильної і НВЧ установок.

### Виклад основного матеріалу

*Методологія процесу спучення.* Спученням називають процес збільшення об'єму зерен матеріалу при термообробці, що супроводжується утворенням високопористої внутрішньої структури з переважанням закритих пор. Пороутворювачем тут є вода (в основному силанольна і молекулярна, сильно пов'язана водневими зв'язками з немостиючими атомами кисню). До початку термообробки в результаті взаємодії поверхні сирцевої рідинноскляної гранули з вуглекислим газом повітря утворюється шар більш щільного кремнегелю. При тепловій обробці нагрівання гранули за об'ємом відбувається нерівномірно. Зовні вона піддається більш значному впливу тепла. Поверхневий шар кремнегелю звільняється від поверхневої вологи, розм'якшується при температурі близько 100 °С і переходить в тонку еластичну малопористу оболонку. Під впливом надлишкового тиску еластична оболонка гранули подовжується, об'єм збільшується, і утворюється спучена гранула. На цьому самому етапі відбувається формування пористої структури рідинноскляної гранули [12].

*Термічні перетворення у рідинному склі.* Процеси спучення рідинноскляних зерен при традиційному конвективному нагріві відбуваються за температур 300–500 °С, що пов'язано з необхідністю перебігу полімеризаційних процесів гідросилікатів натрію. Їх термічні перетворення докладно розглянуті у роботі В. І. Корнеєва [13], де відзначено, що в основі кристалічних форм рідинного скла (РС) лежить ортокремнієва кислота  $\text{Si}(\text{OH})_4$ , яка існує у вигляді аморфного гідратованого кремнезему  $\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ . Відомі ортосилікати натрію всіх ступеней заміщення цієї чотирьохосновної кислоти. Кремнекислота може давати безліч полікремнієвих похідних за рахунок утворення силосанових зв'язків. Всі чотири ортосилікати натрію утворюють безліч кристалогідратів, до складу яких входить до восьми молекул води. Молекули води пов'язані водневими зв'язками з кремнекисневими аніонами [14]. У системі  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  зі зростанням температури вміст води швидко зменшується і при 72 °С у рівновазі з розчином знаходиться безводний мета-силікат натрію. Зі зростанням температури розчинність усіх кристалогідратів підвищується, а метасилікату натрію – зменшується. Це відбувається, оскільки реакція утворення силосанових

зв'язків має достатньо велику енергію активації, і швидкість утворення полісилікатних іонів зі зростанням температури різко збільшується, що зменшує розчинність системи. Безводний метасилікат натрію відноситься до полі- або ланцюгових силікатів, на відміну від гідратних форм. Оскільки швидкість утворення силосанових зв'язків у сильно лужних системах при температурі, меншій за 100 °С, мала, безводний метасилікат натрію при температурі 70–100 °С отримати неможливо. При температурах 200–400 °С, крім метасилікатів, з'являються збагачені кремнеземом кристалічні структури. При цьому виникають умови для розвитку полімеризаційних процесів, і в системах з високим силікатним модулем утворюються кристали зі складним аніонним складом аж до кварцу. Видалення конституційної води зі структури РС супроводжується аніонною поліконденсацією, яка зазвичай називається полімеризацією. Так, двозаміщені ортосилікати при нагріванні перетворюються на  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  при 120 °С, однозаміщені ортосилікати натрію полімеризуються до  $\text{Na}_2\text{SiO}_5$  в діапазоні температур 100–300 °С. Тризаміщені ортосилікати спочатку розпадаються на дві фази  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  і  $\text{Na}_2\text{O}$ , а вище 400 °С утворюється бісилікат натрію  $2\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_6\text{Si}_2\text{O}_7$  [13].

*Опис експериментальної установки.* Дослідження процесів спучення рідинноскляних зерен в умовах НВЧ випромінювання проводилося на лабораторній МХ установці, розробленій фахівцями ГНУ НТК «Інститут монокристалів» НАН України (м. Харків). Типовий мікрохвильовий прилад, який використовується для нагріву зразків, складається з чотирьох основних елементів: магнетрона, мікрохвильового резонатора, змішувача і хвилеводу. Мікрохвильове випромінювання генерується магнетроном, передається у робочий простір (резонатор) за допомогою хвилеводу, в якому змішувач розподіляє випромінювання, що надходить, у різних напрямках. Металевий корпус НВЧ-камери слугує для того, щоб направляти НВЧ випромінювання назад на матеріал так, що не буде втрачена НВЧ енергія і обслуговуючий персонал не буде піддаватися НВЧ випромінюванню [15].

Порівняно з побутовими мікрохвильовими печами, лабораторні варіанти забезпечують можливість контролю температури, тиску реакційної суміші та потужності випромінювання, вони створюють однорідне і стабільне

поле і мають системи перемішування. Це забезпечує можливість рівномірного нагрівання реакційних сумішей. Швидке нагрівання системи і швидке охолодження після закінчення процесу дозволяють контролювати час нагріву, що веде до отримання відтворюваних результатів.

*Методика експерименту.* Визначення коефіцієнта спучення проводилося стосовно кінцевого об'єму гранули до початкового:  $K = V_{кін}/V_{поч}$ . (об'єм гранули розраховували як об'єм кулі:  $V_{кулі} = 3/4\pi \cdot R^3$ ).

ККД процесу спучення визначався відповідно до розрахунку показників ефективності сушарних та НВЧ установок.

1) Сушарна установка [16].

Ступінь досконалості будь-якої теплової установки, зокрема і сушарної, оцінюється її енергетичним ККД, який являє собою відношення корисно використаної енергії (теплоти) до всієї витраченої.

ККД сушарної шафи розраховується за формулою

$$\eta = \frac{q_{кор}}{q_{випр}} \quad (1)$$

Для будь-якої сушарної установки корисно використаною теплою потрібно вважати тільки ту теплоту, яка витрачена на випаровування вологи з матеріалу. Ця теплота, віднесена до 1 кг сухого газу (повітря), записується у вигляді

$$q_{кор} = r(x_2 - x_1), \quad (2)$$

де  $r$  – питома теплота пароутворення води;

$x_2$  – маса матеріалу до спучення;

$x_1$  – маса матеріалу після спучення.

Щодо витраченої теплоти, то для конвективних сушарок вона являє собою теплоту, сприйняту 1 кг газу в калорифері:

$$q_{випр} = c_p(t_1 - t_0), \quad (3)$$

де  $c_p$  – теплоємність суміші.

2) НВЧ-установка [17].

Загальну витрату енергії на проведення процесу спучення розраховують за формулою

$$Q_{input} = P \cdot \tau, \quad (4)$$

де  $Q_{input}$  – енергія, що вводиться в систему, Дж;

$P$  – потужність установки;

$\tau$  – тривалість процесу.

Ефективність використання енергії розраховують за формулою

$$\eta = \frac{Q_{abs}}{Q_{input}}, \quad (5)$$

де  $Q_{abs}$  – теплота, яку необхідно повідомити системі для здійснення тих чи інших процесів:

$$Q_{abs} = Q_{heat} + Q_{vap}, \quad (6)$$

де  $Q_{vap}$  – теплота випаровування води;

$Q_{heat}$  – кількість тепла, що витрачається на нагрів суміші до необхідної температури:

$$Q_{heat} = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (7)$$

де  $m$  – маса реакційної суміші;

$c$  – теплоємність суміші, кДж/кг·°С;

$\Delta T$  – різниця між кінцевою і початковою температурами реакційної суміші, °С.

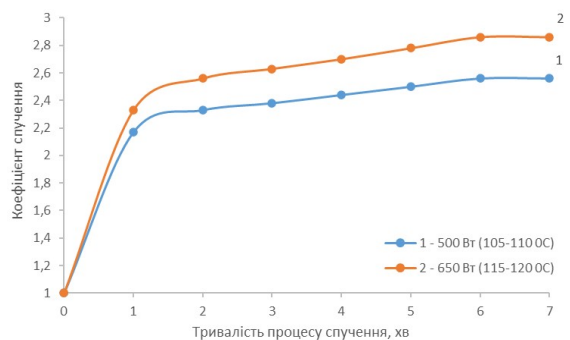
Для наочного порівняння ефективності роботи мікрохвильової і сушарної установок були проведені розрахунки їх енергоспоживання при тривалості роботи 5 хв.

### Результати досліджень

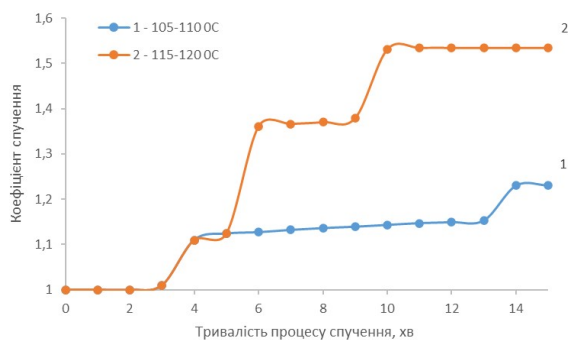
*Визначення коефіцієнта спучення рідинноскляних зерен.* Для порівняння процесу спучення рідинноскляних зерен при НВЧ і конвективному нагріві було визначено залежність коефіцієнта спучення від тривалості нагріву, яка наведена на рисунку 1.

З даних рисунка 1, *а* видно, що вже на першій хвилині коефіцієнт спучення ( $K$ ) сягає значень 2,17 і 2,33 відповідно при потужності випромінювання 650 і 500 Вт. На першому етапі відбувається видалення вільної й адсорбованої води і на графіку спостерігається швидке збільшення  $K$ . Найбільше значення коефіцієнта спучення має зернистий матеріал, отриманий під дією НВЧ випромінювання при потужності 650 Вт (відповідає  $T = 150\text{--}120$  °С), максимальний показник становить 2,86; досягається це значення через 6 хв нагріву. При потужності 500 Вт (відповідає  $T = 105\text{--}110$  °С)  $K$  досягає свого постійного значення також на 6-й хв спучення і дорівнює воно 2,56, а при потужності 650 Вт цього значення  $K = 2,56$  сягає вже через 2 хв нагріву.

З рисунка 1, *б* видно, що у разі спучення зерен при конвективному нагріві за температур, однакових з МХ нагрівом, постійне значення  $K$  досягається на 14-й і 11-й хв спучення відповідно за температур 105–110 °С і 115–120 °С. Найвище значення  $K = 1,534$  має матеріал, який спучується при  $T = 115\text{--}120$  °С протягом 11 хв, тоді як при температурі 105–110 °С  $K$  сягає значення лише 1,23. За низьких температур конвективного нагріву відбувається переважно сушіння матеріалу, що пов'язано з втратою як вільної, так і молекулярно зв'язаної води, це свідчить про перебіг конкуруючих процесів газовиділення та дегідратації.



а)



б)

**Рисунок 1. Залежність коефіцієнта спучення від тривалості процесу:**  
а) НВЧ нагрів, б) конвективний нагрів

Визначення енергоспоживання і ККД сушарної і НВЧ установок.

1) Сушарна установка.

Номинальна потужність сушарної шафи – 1100 Вт.

Корисно використана теплота становить

$$q_{кор} = r(x_2 - x_1) = 2204(1 - 0,92) = 176,32 \text{ кДж},$$

де  $x_2$  – маса матеріалу до спучення, приймаємо 1 кг;

$x_1$  – маса матеріалу після спучення.

Оскільки при спученні в сушарній шафі протягом 5 хв матеріал втрачає близько 8 % маси, то цей показник має значення 0,92 кг;

$r$  – питома теплота пароутворення. Для води при температурі 118 °C значення  $r$  становить 2204 кДж/кг (знайдено шляхом екстраполяції).

Витрачена теплота становить

$$q_{випр} = c_p(t_1 - t_0) = 4,12(118 - 20) = 403,76 \text{ кДж},$$

де  $c_p$  – теплоємність рідинноскляної суміші, розраховуємо як суму теплоємностей компонентів з огляду на їх питомий вміст – теплоємність рідинного скла розрахована і

становить 4,186 кДж/кг °C, теплоємність оксиду цинку – 0,0495 кДж/кг °C.

Звідси  $c_p = 4,186 \cdot 0,985 + 0,0495 \cdot 0,015 = 4,12$  кДж/кг °C;

$t_0$  – температура навколишнього середовища, 20 ± 2 °C;

$t_1$  – температура всередині сушарної шафи, 118 °C.

$$\text{Тоді } \eta = \frac{q_{кор}}{q_{випр}} = \frac{176,32}{403,76} = 0,44.$$

2) НВЧ-установка (потужність НВЧ випромінювання 650 Вт).

Енергія, що вводиться в систему:

$$Q_{input} = P \cdot \tau = 650 \cdot 5 = 3250 \text{ кДж}.$$

Кількість тепла, яка витрачається на нагрівання суміші до необхідної температури:

$$Q_{hea} = m \cdot c \cdot \Delta T = 1 \cdot 4,12 \cdot 98 = 403,8 \text{ кДж}.$$

де  $m$  – маса суміші – 1 кг;

$c$  – теплоємність рідинноскляної суміші, яка знайдена вище і становить  $c_p = 4,12$  кДж/кг °C:

$$\Delta T = 118 - 20 = 98 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Теплота, яку необхідно витратити системі для здійснення процесу:

$$Q_{abs} = Q_{heat} + Q_{var} = 403,8 + 2204 = 2607,8 \text{ кДж},$$

де  $Q_{var}$  – теплота випаровування води. При потужності установки 650 Вт середня температура матеріалу становила 118 °C. Теплота випаровування води при цій температурі становить 2204 кДж/кг.

$$\text{Звідси } \eta = \frac{Q_{abs}}{Q_{input}} = \frac{2607,8}{3250} = 0,8.$$

Як видно з проведених розрахунків, за інших рівних умов, ККД НВЧ-установки перевищує ККД сушарної установки майже вдвічі, отже, спучення рідинноскляного зернистого матеріалу доцільно проводити під дією НВЧ випромінювання.

**Обговорення результатів.** Отримані вище дані дозволяють визначити ефективність обох видів нагріву.

Так, у разі конвективного нагріву має місце наявність індукційного періоду, де спочатку спучення взагалі не відбувається, оскільки відбувається повільний розігрів РС, а для спучення необхідно, щоб матеріал під час водовідокремлення знаходився в розм'якшеному, піропластичному стані, оскільки основною умовою, яка забезпечує спучення при термообробці, є суміщення в часі піропластичного стану матеріалу з найбільш інтенсивним газо-



виділенням. Піропластичні властивості лужних розчинних силікатів виявляються у температурному інтервалі 120–250 °С, що відповідає максимальному водовидаленню [18].

Під дією ж НВЧ випромінювання, можна припустити, що піропластичного стану РС набуває вже при 100 °С, за цієї температури відбувається і максимальне видалення води, оскільки РС має іонну провідність, а у речовин з іонною провідністю, за рахунок збудження МХ полем іонних токів, дифузійні процеси значно інтенсифікуються, на відміну від речовин діелектриків. Тому, на відміну від конвективного нагріву під дією НВЧ випромінювання, процес з самого початку йде з великою швидкістю.

Можливість нетеплової модифікації електромагнітним полем НВЧ випромінювання РС зводиться до підвищення енергії хаотичного теплового руху молекул води у рідинному склі, що сприяє його інтенсивній полімеризації за більш низьких температур, низькомолекулярні фракції при цьому стають менш дефектними з більш міцною поперечно-зшитою структурою, водночас у матеріалі не виникає руйнуючих термомеханічних напруг, що підвищує його міцність [19].

Ефективне спучення гідрогелю можливе лише за умови, що при визначеному водовмісті температура початку дегідратації перевищує температуру склування, і це співвідношення якісно зберігається під час дегідратації аж до повного зневоднення. Як відомо, підвищення ступеня полімеризації кремнекисневих аніонів у гідрогелі різко підвищує температуру склування і знижує температуру початку дегідратації (через перехід частини води з силанольної в молекулярну), що може зробити термічне спучення неможливим [13].

Слід зауважити, що зернистий матеріал на основі рідинного скла отримують при температурі 300–500 °С, тому спучення при конвективному нагріві за температур, що відповідають температурам процесу в мікрохвильовій установці, буде малоефективним.

Ефективність перебігу процесу спучення рідинноскляних зерен в НВЧ установці було підтверджено також шляхом визначення енергоспоживання і ККД сушарної та НВЧ установок і показано, що ККД НВЧ установок майже вдвічі перевищує ККД сушарної установи.

Нині існують промислові НВЧ установи різних моделей. Поряд із класичними камерними НВЧ печами у промисловості засто-

совуються безперервно працюючі сушарні та нагрівальні установки. Так, існують конвеєрні НВЧ установки, які застосовують переважно для процесів сушіння (рисунк 2). Вони складаються з великої кількості магнетронів і циліндричної МХ камери. Вологе повітря відсмоктують з печі за допомогою систем відкачування. Такі установки можуть бути застосовані для сушіння та спучення зернистого матеріалу [20].



Рисунок 2. Конвеєрна НВЧ-установка

Для сушіння та спучення зерен можуть бути також застосовані установки «Vermic», які використовуються для спучення вермікулиту [21] (рисунк 3).

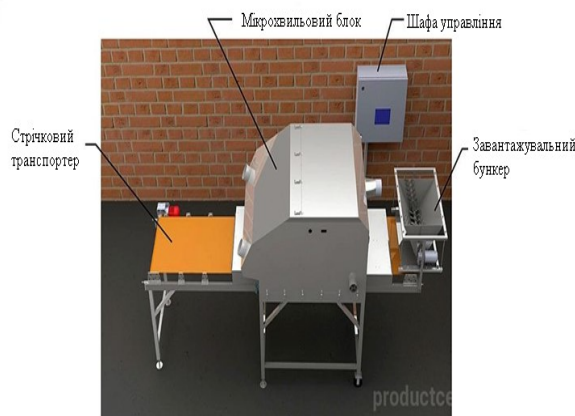


Рисунок 3. Установка «Vermic»

**Висновки.** Встановлено, що під дією НВЧ випромінювання за однакових температур з конвективним нагрівом вдвічі інтенсивніше відбувається спучення зернистого матеріалу. Так, при потужності 650 Вт ( $T = 115\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) коефіцієнт спучення досягає свого постійного значення 2,86 вже на 6-й хв процесу, тоді як при спученні зерен при конвективному нагріві, за тієї самої температури, найвище значення  $K = 1,534$ , і досягається воно

через 11 хв, що свідчить про складність спучення зерен за цих умов через перебіг конкуруючих процесів поризації та дегідратації.

Визначення енергоспоживання і ККД сушарної та НВЧ-установок доводять, що процес спучення під дією НВЧ випромінювання проводити набагато ефективніше, ніж при традиційному конвективному нагріванні. Так, ККД НВЧ установки майже в два рази перевищує ККД сушарної установки, які дорівнюють відповідно 0,8 і 0,44.

#### Список використаних джерел

- [1] A. Seco, J. M. del Castillo, C. Perlot, S. Marcelino, and S. Espuelas, "Recycled granulates manufacturing from spent refractory wastes and magnesium based binder", *Construction and Building Materials*, vol. 365, 130087, 2023.  
doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130087/.
- [2] M. Li et al., "Energy-saving production of high value-added foamed glass ceramic from blast furnace slag and hazardous wastes containing heavy metal ions", *Journal of Cleaner Production*, vol. 383, 135544, 2023.  
doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135544.
- [3] M. Shi, T.-C. Ling, B. Gan, and M. Guo, "Turning concrete waste powder into carbonated artificial aggregates", *Construction and Building Materials*, vol. 199, pp. 178-184, 2019.  
doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.021.
- [4] И. И. Юцис, *Новое технологическое оборудование для производства теплоизоляционных материалов*. Москва, Россия: Стройиздат, 1985.
- [5] O. Miryuk, F. Fediuk, and M. Amran, "Foam glass crystalline granular material from a polymineral raw mix", *Crystals*, vol. 11(12), p. 1447, 2021.  
doi: 10.3390/cryst11121447.
- [6] O. Miryuk, F. Fediuk, and M. Amran, "Porous fly ash/aluminosilicate microspheres-based composites containing lightweight granules using liquid glass as binder", *Polymers*, vol. 14 (17), p. 3461, 2022.  
doi: 10.3390/polym14173461.
- [7] A. S. Apkarian, L. A. Gomze, J.-E. F. M. Ibrahim, and S. N. Kulkov, "Sintering of silica-alumina granular materials and its catalytic properties", *Journal of Silicate Based and Composite Materials*, vol. 73, no. 4, pp. 132-136, 2021.  
doi: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2021.19.
- [8] K. Weinberger, "Expanded-glass granular material and method for producing same", *WO2016124428A1. C03C11/007, Date pat. 11.08.2016*. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/WO2016124428A1/en/>.
- [9] A. M. Pavlenko, and H. V. Koshlak, "Thermal insulation materials with porous structure", *Journal of New Technologies in Environmental Science*, vol. 2, no. 4, pp. 187-196, 2018.  
doi: 10.30540/sae-2018-025.
- [10] Qi Hu et al., "Microwave technology: A novel approach to the transformation of natural metabolites". *Chinese Medicine*, vol. 16, article no. 87, 2021.  
doi: 10.1186/s13020-021-00500-8.
- [11] D. A. Jones, T. P. Lelyveld, S. D. Mavrofidis, S. W. Kingman, and N. J. Miles, "Microwave heating applications in environmental engineering - a review", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 34, pp. 75-90, 2002.  
doi: 10.1016/S0921-3449(01)00088-X.
- [12] А. И. Кудяков, Н. А. Свергунова, и М. Ю. Иванов, *Зернистый теплоизоляционный материал на основе модифицированной жидкостекольной композиции: монография / под ред. А. И. Кудякова*. Томск, Россия: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010.
- [13] В. И. Корнеев, и В. В. Данилов, *Растворимое и жидкое стекло*. Санкт-Петербург, Россия: Стройиздат, 1996.
- [14] R. Iler, *The Colloid Chemistry of Silica and Silicates*. Itaka, N.Y., 1955.
- [15] С. Demitri et al., "Preparation and characterization of cellulose-based foams via microwave curing". *Interface Focus*, vol. 4, p. 20130053, 2014.
- [16] К. В. Луняка, Б. В. Димо, Н. Б. Андреева, та І. В. Калініченко, *Розрахунки з дисципліни "Теплотехнологічні процеси та установки"*: навч. посіб. Херсон, Україна: ХНТУ, 2018.
- [17] Н. А. Пинчукова, "Основы технологии получения кокарбоксылазы гидрохлорида с использованием микроволнового излучения": дис. канд. техн. наук: 05.17.04. Харьков, Украина, 2014.
- [18] В. Г. Гречанюк, *Фізична хімія і хімія силікатів: підручник*. Київ, Україна: Кондор, 2006.
- [19] Т. Е. Римар, "Дослідження впливу НВЧ випромінювання на властивості грану-

- льованих теплоізоляційних матеріалів на основі рідинного скла", *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, вип. 196, с. 6-16, Харків, 2021.
- [20] И. Именохоев, Х. Виндсхаймер, Р. Вайтц, Н. Кинтсель, и Х. Линн, "Технология СВЧ-нагрева: потенциал и границы". [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.linn-high-therm.de/fileadmin/user\\_upload/pages/about\\_us/download/publications/white\\_papers/MikrowellenerwaermungRus.pdf](https://www.linn-high-therm.de/fileadmin/user_upload/pages/about_us/download/publications/white_papers/MikrowellenerwaermungRus.pdf).
- [21] "Установки для вспучивания вермикулита VERMIC". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://tsc-technologies.ru/ru/oborudovanie/ustanovki-dlya-vspuchivaniya-vermikulita-vermic/>.
- ### References
- [1] A. Seco, J. M. del Castillo, C. Perlot, S. Marcelino, and S. Espuelas, "Recycled granulates manufacturing from spent refractory wastes and magnesium based binder", *Construction and Building Materials*, vol. 365, 130087, 2023. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130087/.
- [2] M. Li et al., "Energy-saving production of high value-added foamed glass ceramic from blast furnace slag and hazardous wastes containing heavy metal ions", *Journal of Cleaner Production*, vol. 383, 135544, 2023. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135544.
- [3] M. Shi, T.-C. Ling, B. Gan, and M. Guo, "Turning concrete waste powder into carbonated artificial aggregates", *Construction and Building Materials*, vol. 199, pp. 178-184, 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.021.
- [4] I. I. Yutsis, *New technological equipment for the production of thermal insulation materials*. Moscow, Russia: Stroizdat, 1985 [in Russian].
- [5] O. Miryuk, F. Fediuk, and M. Amran, "Foam glass crystalline granular material from a polymineral raw mix", *Crystals*, vol. 11(12), p. 1447, 2021. doi: 10.3390/cryst11121447.
- [6] O. Miryuk, F. Fediuk, and M. Amran, "Porous fly ash/aluminosilicate microspheres-based composites containing lightweight granules using liquid glass as binder", *Polymers*, vol. 14 (17), p. 3461, 2022. doi: 10.3390/polym14173461.
- [7] A. S. Apkarian, L. A. Gomze, J.-E. F. M. Ibrahim, and S. N. Kulkov, "Sintering of silica-alumina granular materials and its catalytic properties", *Journal of Silicate Based and Composite Materials*, vol. 73, no. 4, pp. 132-136, 2021. doi: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2021.19.
- [8] K. Weinberger, "Expanded-glass granular material and method for producing same", *WO2016124428A1. C03C11/007, Date pat. 11.08.2016*. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/WO2016124428A1/en/>.
- [9] A. M. Pavlenko, and H. V. Koshlak, "Thermal insulation materials with porous structure", *Journal of New Technologies in Environmental Science*, vol. 2, no. 4, pp. 187-196, 2018. doi: 10.30540/sae-2018-025.
- [10] Qi Hu et al., "Microwave technology: A novel approach to the transformation of natural metabolites". *Chinese Medicine*, vol. 16, article no. 87, 2021. doi: 10.1186/s13020-021-00500-8.
- [11] D. A. Jones, T. P. Lelyveld, S. D. Mavrofidis, S. W. Kingman, and N. J. Miles, "Microwave heating applications in environmental engineering - a review", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 34, pp. 75-90, 2002. doi: 10.1016/S0921-3449(01)00088-X.
- [12] A. I. Kudyakov, N. A. Svergunova, and M. Yu. Ivanov, *Granular heat-insulating material based on a modified liquid glass composition*: monograph, A. I. Kudyakov, Ed. Tomsk, Russia: Izd-vo Tom. gos. arkhitekt. un-ta, 2010 [in Russian].
- [13] V. I. Korneev, and V. V. Danilov, *Soluble and liquid glass*. St-Petersburg, Russia: Stroizdat, 1996 [in Russian].
- [14] R. Iler, *The Colloid Chemistry of Silica and Silicates*. Itaka, N.Y., 1955.
- [15] C. Demitri et al., "Preparation and characterization of cellulose-based foams via microwave curing". *Interface Focus*, vol. 4, p. 20130053, 2014.
- [16] K. V. Luniaka, B. V. Dymo, N. B. Andrieieva, and I. V. Kalinichenko, *Calculations from the discipline "Heat-technological processes and installations"*: textbook. Kherson, Ukraine: KhNTU, 2018 [in Ukrainian].
- [17] N. A. Pinchukova, "Fundamentals of technology for obtaining cocarboxylase hydro-



- chloride using microwave radiation": Ph.D. thesis: 05.17.04. Kharkov, Ukraine, 2014 [in Russian].
- [18] V. H. Hrechaniuk, *Physical chemistry and chemistry of silicates*: textbook. Kyiv, Ukraine: Kondor, 2006 [in Ukrainian].
- [19] T. E. Rymar, "Investigation of the influence of microwave radiation on the properties of granular heat-insulating materials based on liquid glass", *Zbirnyk naukovykh prats Ukr-DUZT*, iss. 196, pp. 6-16, Kharkiv, 2021 [in Ukrainian].
- [20] I. Imenokhiov, H. Windsheimer, R. Weitz, N. Kintsel, and H. Lynn, "Microwave heating technology: potential and limits". [Online]. Available: [https://www.linn-high-therm.de/fileadmin/user\\_upload/pages/about\\_us/download/publications/white\\_papers/Mikrowelle\\_nerwaermungRus.pdf](https://www.linn-high-therm.de/fileadmin/user_upload/pages/about_us/download/publications/white_papers/Mikrowelle_nerwaermungRus.pdf) [in Russian].
- [21] "Installation for swelling vermiculite VERMIC". [Online]. Available: <http://tsc-technologies.ru/ru/oborudovanie/ustanovki-dlya-vspuchivaniya-vermikulita-vermic/> [in Russian].

**T. E. Rymar**, *Dr. Tech. Sc., Associate Professor,*  
*Professor at the Department of Chemical Engineering and Ecology*  
e-mail: rymartanyana1975@gmail.com  
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University  
Ioann Pavel II St., 17, Kyiv, 01042, Ukraine

#### APPLICATION OF MICROWAVE INSTALLATIONS FOR SWELLING OF GRANULAR THERMAL INSULATION MATERIALS BASED ON LIQUID GLASS

*The paper studies the process of obtaining swelled granular materials based on liquid glass under the action of microwave radiation and compares it with the process of obtaining these materials with traditional convective heating. It has been established that under the action of microwave radiation at the same temperatures with convective heating, swelling of granular material occurs twice as intensively. Thus, at a power of 650 W ( $T=115-120$  °C), the swelling coefficient reaches its constant value of 2.86 already at the 6th minute of the process, while when grains swell during convective heating at the same temperature, the highest value of the swelling coefficient is 1.534, and it is reached after 11 minutes, which indicates the complexity of grain swelling under these conditions, due to the occurrence of competing processes of porization and dehydration. The acceleration of the swelling process and the possibility of carrying it out at lower temperatures are due to the fact that under the action of microwave radiation due to the excitation of ionic currents by the microwave field, diffusion processes of substances with ionic conductivity, which include liquid glass, are significantly intensified. The impossibility of carrying out the process at given temperatures during convective heating is explained by the fact that the main condition which ensures swelling during heat treatment is the coincidence in time of the pyroplastic state of the material with the most intense gas evolution. The pyroplastic properties of alkali soluble silicates are manifested in the temperature range of 120-250 °C, which corresponds to the maximum water removal, that is, at the temperatures of 115-120 °C, the process is just beginning. To confirm the effectiveness of the use of microwave installations, the energy consumption and efficiency ratio of the installations have been calculated and it is determined that the efficiency ratio of the microwave installation is almost twice the efficiency ratio of the drying installation. The paper also presents the types of industrial microwave installations in which it is possible to carry out the process of swelling of liquid glass grains.*

**Keywords:** granular materials, liquid glass, microwave radiation, convective heating, swelling coefficient, efficiency ratio.

*Стаття надійшла 19.01.2023*

*Прийнято 22.03.2023*