

**БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)**

---

УДК 691-405.8

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАДВИСОКОЧАСТОТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ГРАНУЛЬОВАНИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ РІДИННОГО СКЛА**

Канд. техн. наук Т. Е. Римар

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MICROWAVE RADIATION ON THE PROPERTIES OF GRANULAR HEAT INSULATION MATERIALS BASED ON LIQUID GLASS**

PhD (Tech.) T. Rymar

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.241543>

*Анотація.* Основними методами поліпшення експлуатаційних властивостей гранульованих теплоізоляційних матеріалів на основі рідинного скла є хімічні методи їх модифікації, які базуються на зміні їх структури завдяки використанню спеціальних інгредієнтів. При цьому виникає необхідність у введенні часто великої кількості компонентів та окремих технологічних операцій, що не завжди є технологічним. Одним з перспективних методів зміни фізичного стану речовин під дією електромагнітного поля є нетеплова обробка матеріалу надвисокочастотним (НВЧ) випромінюванням. Переваги використання НВЧ-випромінювання в порівнянні із загальноприйнятими методами модифікації матеріалів полягають у перетворенні їх структури без значних змін технологічного процесу і необхідності застосування додаткових компонентів. Завдяки об'ємному нагріву і механізму нетеплової дії НВЧ-випромінювання на оброблювальні об'єкти значно знижується тривалість їх нагріву. При НВЧ-нагріві рідинно-скляної композиції частина енергії електромагнітного випромінювання перетворюється на теплоту, яка сприяє інтенсивному спученню матеріалу, а інша її частина направлена на структурні зміни в матеріалі, які призводять до поліпшення його властивостей, що пов'язано з ефектом нетеплової дії НВЧ-випромінювання. Проведені дослідження доводять, що найкращим комплексом експлуатаційних властивостей володіють гранульовані матеріали, отримані під дією НВЧ-випромінювання при потужності 650 Вт, яка відповідає температурі 110–120 °С. Необхідна тривалість такої термообробки складає 6–7 хв. Найбільш близькими до них за коефіцієнтом спучення є матеріали, отримані при конвективному нагріві при температурі 200 °С впродовж 1 год, але фізико-механічні властивості їх значно нижчі. Таким чином можна відзначити, що застосування НВЧ-випромінювання дає змогу отримати гранульовані теплоізоляційні матеріали з кращим комплексом експлуатаційних властивостей при більш низьких енергетичних витратах на їх виробництво.

**Ключові слова:** гранульовані теплоізоляційні матеріали, рідинне скло, НВЧ-випромінювання, конвективний нагрів, експлуатаційні властивості.

**Abstract.** The main methods of improving the performance of granular thermal insulation materials based on liquid glass are chemical methods of their modification, which are based on changing their structure through the use of special ingredients. At the same time, there is a need to

*introduce often a large number of components and individual technological operations, which is not always technological. One of the promising methods of changing the physical state of substances under the action of an electromagnetic field is non-thermal treatment of microwave radiation. The advantages of using microwave radiation in comparison with the generally accepted methods of modification of materials are the transformation of their structure without significant changes in the technological process and the need to use additional components. Due to volumetric heating and the mechanism of non-thermal action of microwave radiation on processing objects the duration of their heating considerably decreases. When microwave heating of a liquid glass composition part of the energy of electromagnetic radiation is converted into heat, which contributes to the intense swelling of the material, and the other part is aimed at structural changes in the material, which improve its properties due to the non-thermal effect of microwave radiation. Studies show that the best set of performance properties have granular materials obtained under the action of microwave radiation at a power of 650 W, which corresponds to a temperature of 110-120 °C. The required duration of such heat treatment is 6-7 minutes. The closest to them in terms of coefficient of swelling are materials obtained by convective heating at a temperature of 200 °C for 1 hour, but their physical and mechanical properties are much lower. Thus, it can be noted that the use of microwave radiation allows to obtain granular thermal insulation materials with a better set of performance properties at lower energy costs for their production.*

**Keywords:** *granular thermal insulation materials, liquid glass, microwave radiation, convective heating, performance properties.*

**Вступ.** Наведені у науково-технічній літературі дані свідчать про досить широке застосування у будівництві зернистих утеплювачів на основі мінеральної сировини [1]. Прикладами таких матеріалів є сіопор (кремнезит), силікопор, бісіпор, склопор і т. ін. Сіопор виходить при спученні дробленого сіоліту – продукту взаємодії природної сировини (трепелу, опоки та інших матеріалів, які містять аморфний кремнезем) з каустичною содою. Його насипна густина 70–250 кг/м<sup>3</sup>, а теплопровідність 0,04–0,075 Вт/м·К [2]. Сировиною для виробництва силікопору служать кварцовий пісок, лужний компонент і технологічні добавки; він має середню густина 200–250 кг/м<sup>3</sup>, а теплопровідність 0,07–0,085 Вт/м·К [3]. Бісіпор виготовляють з природної сировини і лужних силікатів (рідинне скло, отримане розчиненням кремнеземистої сировини у їдкому лузі); його насипна густина коливається в межах 20–700 кг/м<sup>3</sup>, а теплопровідність 0,03–0,1 Вт/м·К [4]. На основі рідинного скла з силікат-брили і мінеральних наповнювачів отримують спучений матеріал у вигляді легких гранул

склопор, який характеризується насипною густиною 40–200 кг/м<sup>3</sup> і теплопровідністю 0,03–0,06 Вт/м·К [5–6]. Шляхом розпилення рідинно-скляної суміші у баштовій сушарці отримують силіпор, у цьому випадку грануляція і спучення поєднані в одній операції, а матеріал відрізняється меншим, в порівнянні з склопором, розміром гранул та їх меншою теплопровідністю (0,028–0,035 Вт/м·К) [6].

Схема виробництва гранульованих матеріалів на основі рідинного скла включає чотири головні стадії: а) приготування сировинної суміші; б) грануляцію з одночасним затвердінням; в) сушіння грануляту; г) спучення грануляту при 300–500 °C.

Процес приготування рідинно-скляної композиції (РСК) для отримання бісеру здійснюється у високошвидкісному змішувачі шляхом перемішування натрієвого рідинного скла, тонкомелених мінеральних наповнювачів і спеціальних добавок. Готова РСК, що являє однорідну за складом в'язку суміш, подається на вальці або в екструдер (шнековий прес з дірчастою насадкою). Стрічка, що вийшла з екструдера, розрізається на зерна заданих

розмірів у ножовій ротаційній дробарці. Відформовані сирцеві гранули для запобігання злипанню підсушуються димовими газами, що відходять від теплових агрегатів, і надходять на низькотемпературну термообробку. Спучення сирцевого грануляту може здійснюватися в різних теплових агрегатах – сушарних барабанах, тунельних печах і печах з киплячим шаром, вертикальних сушарних вібраційних установках і т. п. [7].

Ю. П. Горлов при виробництві склопору запропонував інший вид грануляції бісеру, який полягає у використанні як середовища для формування сирцевих гранул розчину хлористого кальцію. Так, приготована РСК подається на фільтеру і, проходячи крізь її отвори, розділяється на краплі. Рідинно-скляні краплі потрапляють у спеціальну ємність з розчином  $\text{CaCl}_2$ , обладнану транспортною стрічкою. Формування гранул в розчині триває 20–30 хв. За цей час гранули набирають механічної міцності, необхідної для подальшого транспортування та спучення [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існує багато робіт, присвячених підвищенню експлуатаційних характеристик гранульованих теплоізоляційних матеріалів на основі рідинного скла шляхом введення різних наповнювачів та хімічних добавок. Найбільш ранні дослідження таких матеріалів проводились московською школою Горлова Ю. П і Меркіна А. П., де було розроблено легкий мінеральний гранульований матеріал – склопор. У сировинну базу для виробництва таких матеріалів входять: натрієве рідинне скло, дрібнодисперсні мінеральні наповнювачі та спеціальні добавки. Призначення дрібнодисперсних наповнювачів – спіснення РСК, необхідне для досягнення оптимальних реологічних характеристик суміші і підвищення міцності матеріалу, як такі можуть бути використані крейда, пісок, тальк, маршаліт, каолін, оксид алюмінію, азбестовий пил та ін. Як спеціальні

гідрофобізуючі добавки, які підвищують водостійкість і спучуваність матеріалу, була застосована кремнійорганічна рідина ГКЖ [2]. Відома велика кількість робіт Кудякова А. І., Свергунової Н. А., Іванова М. Ю., в яких досліджуються процеси отримання зернистих матеріалів з добавками мікрокремнезему, золи-винос, техногенних промислових відходів, а також матеріали на основі високомодульного рідинного скла, на основі яких розроблено склади і технології отримання матеріалів із середньою густиною 70–200  $\text{кг/м}^3$  і теплопровідністю 0,05–0,07  $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$  [8]. Роботи Лотова В. А. і Кутугіна В. А. присвячені дослідженню процесів формування пористої структури гранульованих матеріалів на основі рідинно-скляних композицій у присутності різних наповнювачів та хімічних добавок [9]. Підвищення ефективності теплоізоляційних матеріалів досягається і шляхом модифікації рідинного скла. Так, у роботі Страхова А. В. [10] встановлено закономірності структуроутворення теплоізоляційних матеріалів (ТІМ) на основі модифікованих силікатнатрієвих композицій, наповнених бінарними активними мінеральними добавками з використанням сировинних природних і техногенних ресурсів. У роботі Сапоровської Т. Ю. [11] для виробництва теплоізоляційних гранул було використано рідинне скло з непрореагованим діоксидом кремнію, для підвищення водостійкості і міцності до складу рідинно-скляної суміші введені добавки трепелу, опоки, аморфних відходів, що містять кремнезем, склобою боросилікатного скла. Заболотською А. В. [12] розроблено склади ТІМ на основі рідинного скла і природних силікатів (цеоліту, воластоніту, діопсиду, тремоліту), які володіють високою механічною міцністю та хімічною стійкістю.

Наведені хімічні методи модифікації рідинно-скляних композицій (РСК) з метою поліпшення експлуатаційних властивостей ТІМ базуються на зміні їх структури завдяки використанню спеціальних інгредієнтів.

При цьому виникає необхідність у введенні часто великої кількості компонентів та окремих технологічних операцій, що не завжди є виправданим, оскільки супроводжується потребою у зберіганні сировинних інгредієнтів і приготованих композицій, операцій їх транспортування, дозування, перемішування та ін. Одним з перспективних методів зміни фізичного стану речовин під дією електромагнітного поля є нетеплова обробка матеріалу НВЧ-випромінюванням. Переваги використання НВЧ-випромінювання в порівнянні із загальноприйнятими методами модифікації матеріалів полягають у перетворенні їх структури без значних змін технологічного процесу і необхідності застосування додаткових компонентів.

Як відомо, завдяки об'ємному нагріву і механізму нетеплової дії НВЧ-випромінювання на оброблювальні об'єкти значно знижується тривалість їх нагріву. Крім того при дослідженні нетеплової дії НВЧ-випромінювання на властивості полімерних матеріалів відзначається його позитивний вплив на міцнісні властивості більшості полярних полімерів. Тому вважаємо можливим поліпшення експлуатаційних властивостей ТІМ на основі рідинного скла при дії НВЧ-випромінювання.

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 і енергетичні витрати істотно нижче, ніж при використанні традиційних методів здійснення цих процесів. Більш того, в ряді випадків шляхом мікрохвильового впливу можна домогтися результатів, яких не можна досягти за допомогою інших методів [13].

У технології силікатних матеріалів мікрохвильове випромінювання застосовується для інтенсифікації процесу отвердження композицій на основі рідинного скла та поліпшення їх властивостей [14–15].

**Визначення мети та завдання дослідження.** Таким чином, метою даного дослідження є вивчення впливу НВЧ-випромінювання на властивості зернистих теплоізоляційних матеріалів на основі рідинного скла в порівнянні з їх отриманням при традиційному конвективному нагріві.

**Основна частина дослідження.** Головною рушійною силою при спученні гранульованого рідинного скла є підвищення тиску пари води при підвищенні температури усередині самої гранули. Цей ефект досягається дією інтенсивного електромагнітного поля надвисоких частот. Під дією НВЧ-поля молекули води (диполі) рідинного скла починають здійснювати коливальні і обертальні рухи. Рух молекул – це і є теплова енергія. Чим більше води в заданому об'ємі, чим більше молекул бере участь в цьому русі, тим більше теплової енергії виділяється. Таким чином відбувається швидке розігрівання за усім об'ємом зразка [16].

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 [17]. До того ж, НВЧ-енергія не вносить забруднень при нагріві, при її використанні відсутні будь-які продукти згорання. Легкість, з якою НВЧ-енергія перетворюється на тепло, дає змогу отримати дуже великі швидкості нагріву, при цьому в матеріалі не виникає руйнівних термомеханічних напруг. Генераторне обладнання повністю електронне і працює практично безінерційно, завдяки чому рівень потужності НВЧ і момент її подачі можна миттєво змінювати [18]. Тому здійснення термоспучення вихідної РСК при виробництві ТІМ за допомогою надвисокочастотних струмів замість

традиційного конвективного нагріву є високоперспективним.

**Методика проведення дослідження.** РСК для гранульованих ТІМ готується шляхом перемішування рідинного скла і мінеральної добавки, призначення якої – збільшення частки твердої фази у вихідній суміші, і як наслідок, зменшення впливу вільної води на поризаційну здатність РСК. Грануляція РСК проводиться у розчині хлориду кальцію, після чого отриманий гранулят сушать до досягнення матеріалом залишкової вологості ~50 %. Далі відбувається спучення гранул під дією НВЧ-випромінювання або при конвективному нагріві.

Проведення досліджень відбувалось в НВЧ-установці із стандартною робочою частотою, яка становить 2,45 ГГц, при вихідній потужності 300, 500, 650 Вт, яким відповідають температури зразків 55–60, 100–110, 110–120 °С, та у сушарній шафі при температурах 100, 200, 400, 600 °С.

При термічному спученні РСК основним пороутворювачем є вода. Класифікують вологовміст у сировинних сумішах таким чином: капілярна вода, яка утримується капілярними силами; адсорбційно зв'язана вода, яка утримується силами Ван-дер-Ваальса у кількості двох – трьох молекулярних шарів, видаляється при температурі понад 100 °С; хімічно зв'язана вода, входить у гідратні новоутворення. Якщо така вода пов'язана основними валентностями, то вона випаровується при температурі 300–500 °С. У кристалогідратах вона може бути зв'язана у вигляді іонів або молекул і утримується у решітці координаційними зв'язками, видаляється при температурі 200–300 °С [19].

З метою дослідження видалення усіх типів води при спученні гранульованого матеріалу була визначена залежність зміни його залишкової вологості від параметрів НВЧ і конвективного нагріву, а також коефіцієнт спучення гранул (рис. 1, 2).

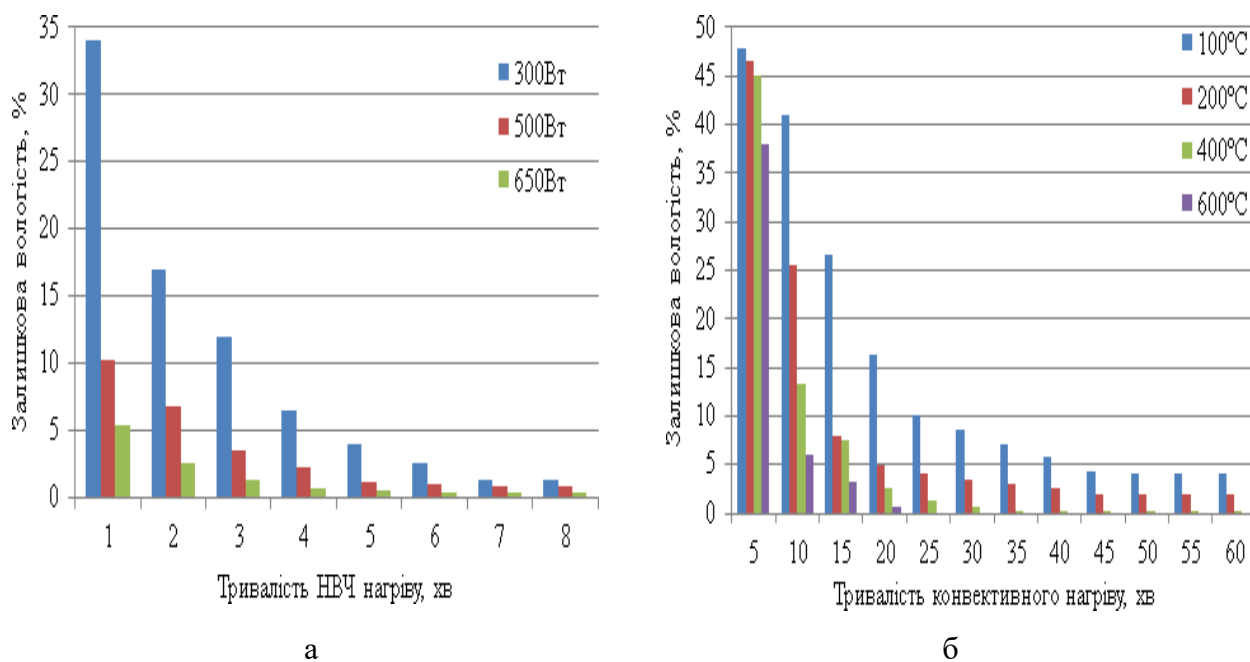


Рис. 1. Залежність залишкової вологості від параметрів НВЧ (а) і конвективного (б) нагріву

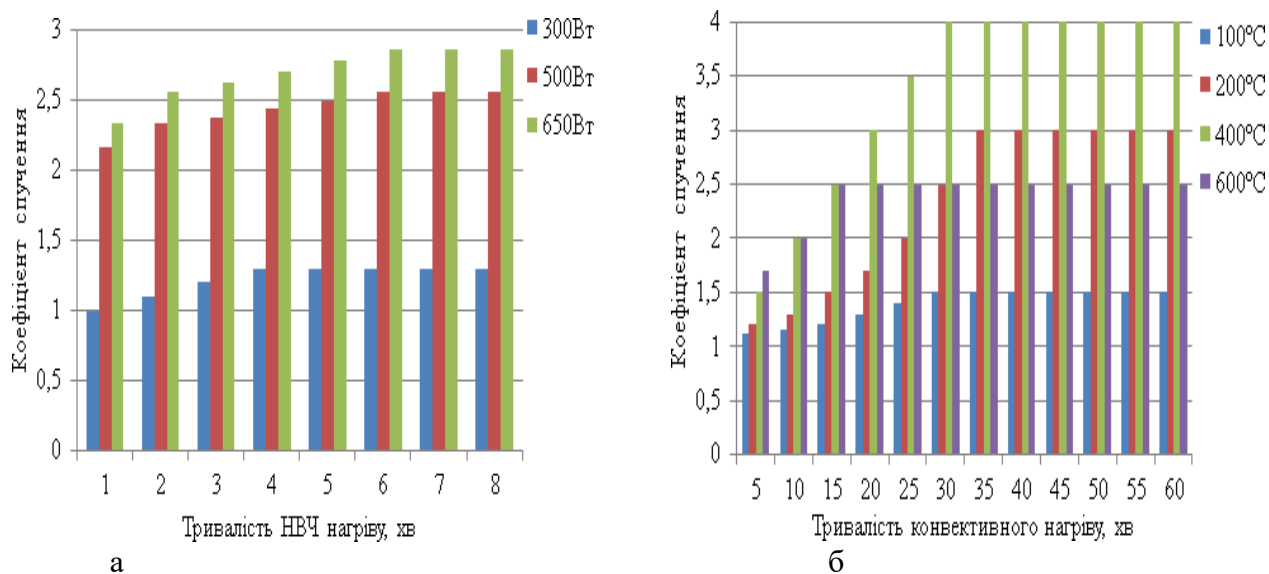


Рис. 2. Залежність коефіцієнта спучення від параметрів НВЧ (а) і конвективного (б) нагріву

З наведених даних видно, що при потужності випромінювання 300 Вт гранули практично не спучились, а зниження залишкової вологості відбувається незначно при поступовому випаровуванні вільної води, оскільки дана потужність замала для інтенсифікації процесу спучення (температура в НВЧ-установці сягає значення лише 55–60 °С). Аналогічні закономірності характерні для процесу спучення гранул при конвективному нагріві при температурі 100 °С. Якщо порівнювати процес спучення гранул за однакових температур (100 °С відповідає потужності установки 500 Вт), то видно, що під дією НВЧ-випромінювання при даній температурі процес спучення відбувається доволі інтенсивно, коефіцієнт спучення гранул дорівнює 2,56, тоді як при конвективному нагріві максимум 1,5, а залишкова вологість дорівнює 0,8 і 4 % відповідно.

Зі збільшенням потужності НВЧ-випромінювання і температури конвективного нагріву швидше відбувається видалення води і збільшення об'єму гранул, однак за деяким виключенням. Так, при температурі 600 °С починається зменшення об'єму спученої структури, в порівнянні з температурами

200 і 400 °С, що пояснюється кристалізацією силікату натрію. Під дією НВЧ-випромінювання набагато швидше відбувається видалення води при спученні гранул. Так, початкова вологість гранул складає ~50 % і при максимальній потужності випромінювання 650 Вт (яка відповідає температурі 110–120 °С) вже на першій хвилині процесу відбувається інтенсивне спучення гранул до коефіцієнта 2,33 і через 1 хв спучення залишкова вологість знижується до 5,4 %. Постійне значення залишкової вологості досягається на 6 хв спучення, а коефіцієнт спучення при цьому сягає свого максимального значення 2,86. При конвективному нагріві зниження залишкової вологості до 5–6 % спостерігається при температурі 200 °С через 20 хв спучення, при 400 °С – через 16 хв і при 600 °С – через 10 хв. Постійного ж значення залишкової вологості при даних температурах досягає через 50, 40 і 30 хв нагріву відповідно та дорівнює 2, 0,2 і 0 %. Якщо порівнювати значення коефіцієнта спучення гранул, то можна зазначити, що при температурах конвективного нагріву 200 і 400 °С він сягає свого максимального значення 3 і 4 відповідно, але при даних температурах значно різняться грануло-

метричний склад спученого матеріалу, так, діаметри спучених при 200<sup>0</sup>С гранул перебувають у межах від 10 до 15 мм, а при 400<sup>0</sup>С – від 10 до 20 мм. До того ж, такий великий діаметр гранул призводить до зниження їх міцності. Гранулометричний склад гранул, спучених під дією НВЧ-випромінювання, більш однорідний, діаметр гранул дорівнює 6–8 мм, які характеризуються доволі високою міцністю.

Таким чином, можна зауважити, що використання НВЧ-нагріву в порівнянні з

традиційним конвективним способом дає змогу зменшити тривалість процесу термічної обробки, що в свою чергу призводить до значного зниження енергоємності отримання матеріалу.

Змінюючи параметри НВЧ-нагріву, можна не тільки управляти процесом спучення гранул, але і впливати на властивості спучених матеріалів. Основні властивості гранульованого ТІМ залежно від параметрів НВЧ і конвективного нагріву наведені на рис. 3–6.

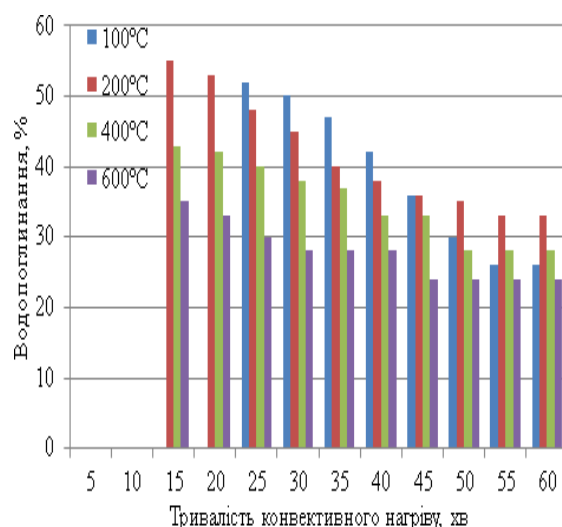
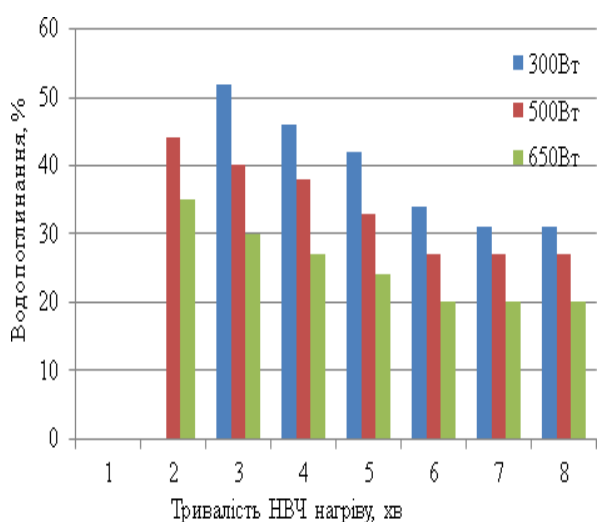


Рис. 3. Залежність водопоглинання від параметрів НВЧ (а) і конвективного (б) нагріву

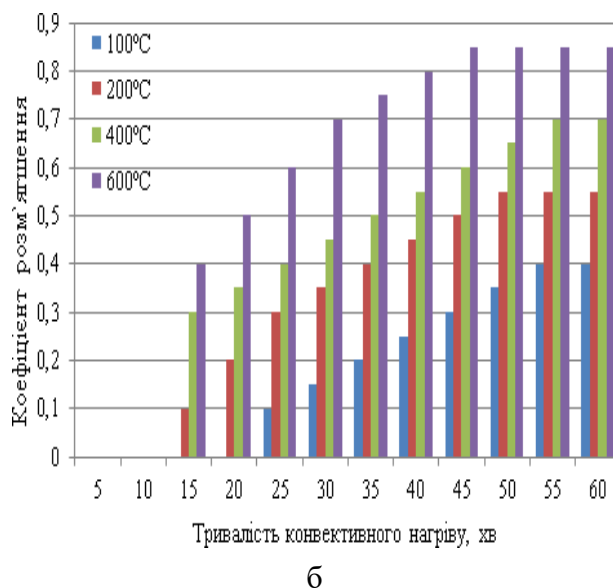
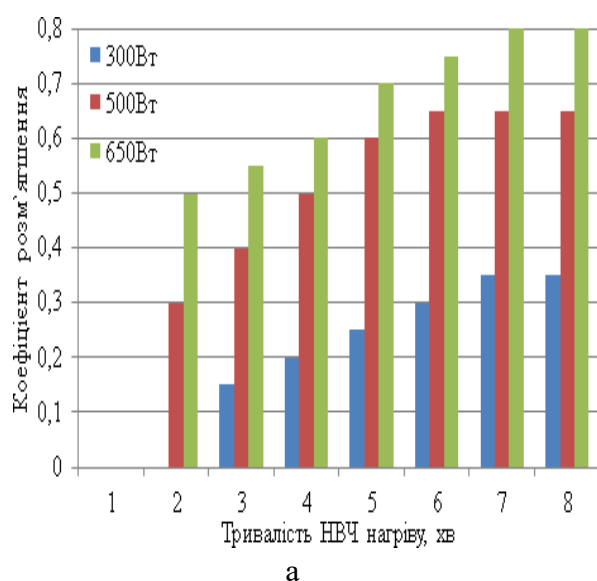


Рис. 4. Залежність коефіцієнта розм'якшення від параметрів НВЧ (а) і конвективного (б) нагріву

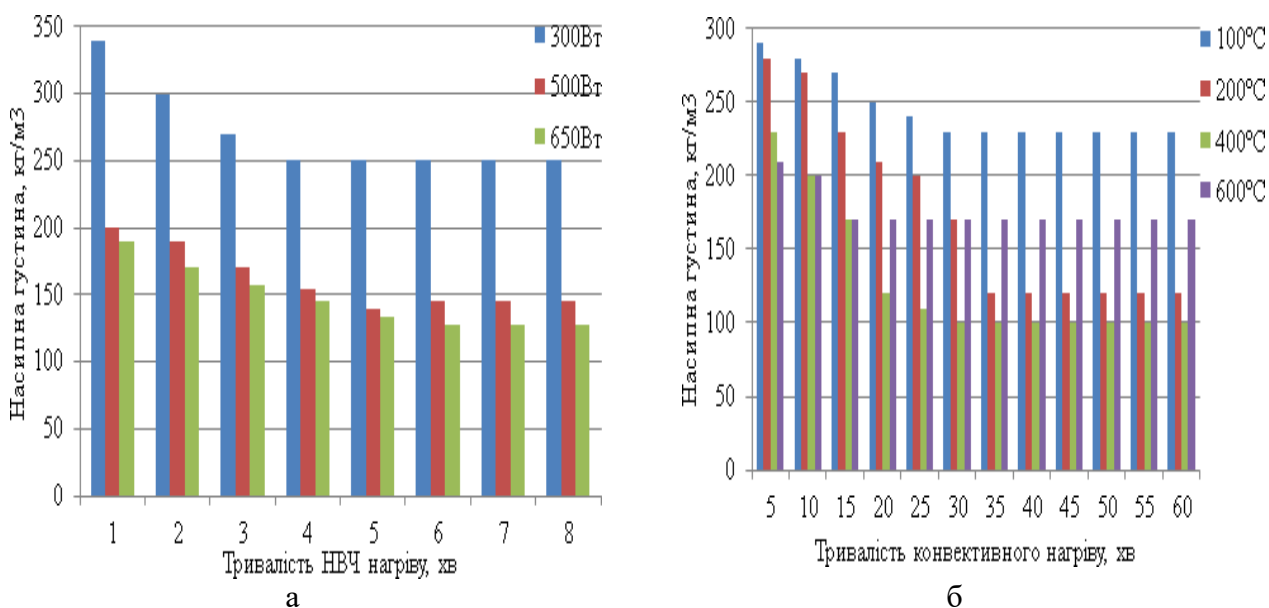


Рис. 5. Залежність насипної густини від параметрів НВЧ (а) і конвективного (б) нагріву

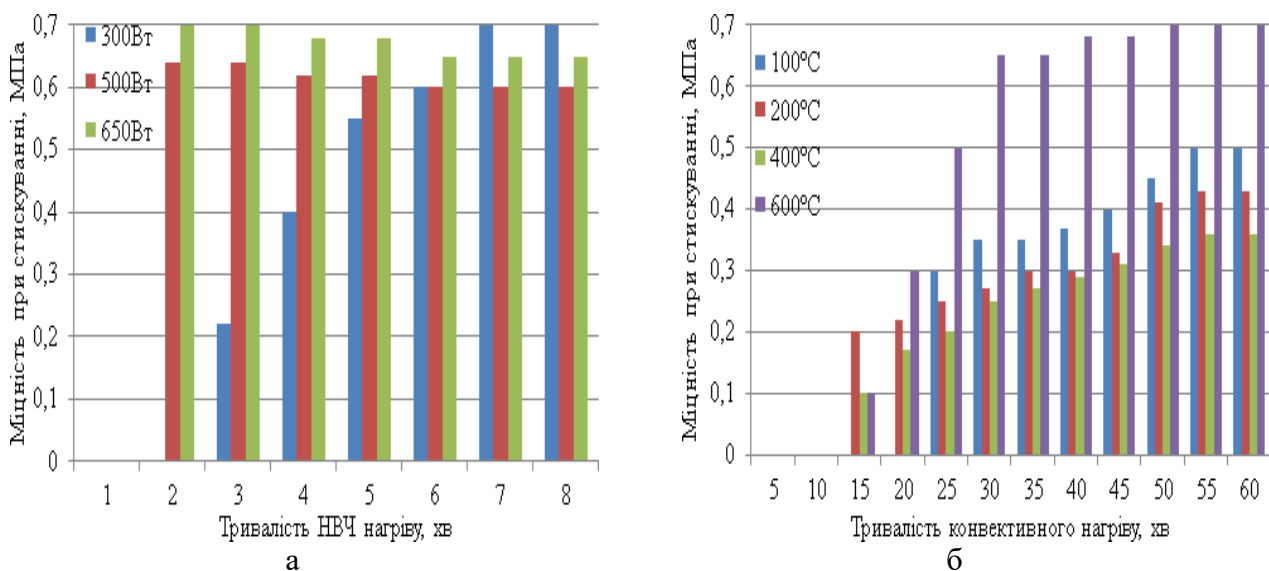


Рис. 6. Залежність міцності при стискуванні від параметрів НВЧ (а) і конвективного (б) нагріву

Випробування на водопоглинання, водостійкість і міцність проводилось на зразках, які спучились та мають достатньо міцну поверхню оболонку, тому для даних досліджень не були використані зразки, спучення і отвердження яких відбувалось впродовж 1 хв під дією НВЧ-випромінювання та 5–10 хв при конвективному нагріві.

Водостійкість гранульованих матеріалів оцінювалась за коефіцієнтом розм'якшення при водопоглинанні, тобто за відношенням міцності матеріалу, насиченого водою, до його міцності в сухому стані.

Завдяки утворенню закритопористої структури гранул під дією НВЧ-випромінювання показники водопоглинання таких зразків мають майже вдвічі менші



значення, ніж у випадку конвективного нагріву. Поглинанню води перешкоджає оплавлений і більш щільний поверхневий шар гранул, що утворюється під дією НВЧ-випромінювання. Навіть при найбільшій температурі 600 °С водопоглинання через 45–60 хв нагріву складає 24 %, тоді як при дії НВЧ-випромінювання на зразки впродовж 6–8 хв водопоглинання складає 20 %. При підвищенні температури до 400–600 °С у спученні бере участь зв'язана вода, що позитивно впливає на пористу структуру гранул, в якій переважає частка закритих пор і відбувається зменшення водопоглинання зразків.

Аналогічні закономірності простежуються і у випадку дослідження водостійкості матеріалів. Найбільш водостійкими є гранули, спучення і отвердження яких проводилось при 600 °С впродовж щонайменше 50 хв, що в 10 разів перевищує тривалість процесу в НВЧ-установці. Також водостійкими є гранульовані матеріали, отримані під дією НВЧ-випромінювання при потужності 650 Вт, оскільки значення коефіцієнта розм'якшення дорівнює 0,8 та при 400 °С,  $K_p = 0,75$ . Решта ж матеріалів не є водостійкими, оскільки коефіцієнт їх розм'якшення менше 0,7.

Визначення міцності гранульованого матеріалу відбувалось при стискуванні його в циліндрі до 20 % деформації.

З даних рис. 5 видно, що зі збільшенням температури і тривалості термообробки, як у разі НВЧ, так і у разі конвективного нагріву, спостерігається зниження насипної густини гранульованого матеріалу внаслідок підвищення коефіцієнта його спучення, обумовлене видаленням хімічно зв'язаної води при підвищенні температури. Виняток складає процес спучення гранул при температурі 600 °С, оскільки, як було зазначено вище, відбувається кристалізація силікату натрію, яка значно активізує процес отвердження РСК, що ускладнює процес поризації, внаслідок чого коефіцієнт спучення має

майже в два рази менше значення, ніж при температурі 400 °С, а насипна густина таких зразків складає 170 кг/м<sup>3</sup>, тоді як при температурі 400 °С – всього 100 кг/м<sup>3</sup>. Однак зі зниженням насипної густини відбувається зниження і міцності гранул.

Слід зауважити, що міцність гранул зростає впродовж тривалості термообробки, і незважаючи на те, що об'єм гранул після 30 хв термообробки вже майже не змінюється, наростання міцності відбувається і далі, і свого постійного значення міцність у більшості випадків сягає після годинної термообробки, що пояснюється процесами структуроутворення.

Насипна густина гранульованого матеріалу, отриманого під дією НВЧ-випромінювання, має більше значення, що обумовлено меншим коефіцієнтом спучення, мінімальне її значення складає 127 кг/м<sup>3</sup> і досягається воно при потужності

НВЧ-випромінювання 650 Вт. Але якщо порівнювати міцність зразків з однаковою насипною густиною, які отримані при НВЧ і конвективному нагріві, можна відзначити, що міцність зразків у випадку НВЧ-випромінювання має в 1,5 рази більше значення, до того ж тривалість термообробки більше майже вдесятеро. Так, якщо міцність гранул, отриманих під дією НВЧ-випромінювання при потужності 650 Вт, має значення 0,65 МПа після 6 хв термообробки, то міцність гранул, отриманих при 200 °С при конвективному нагріві, має значення всього 0,43 МПа і досягається воно після майже годинної термообробки. Найбільш близькими за показниками міцності 0,65 МПа є гранули, отримані при температурі 600 °С впродовж 30 хв термообробки, але насипна густина таких гранул в 1,3 рази вище і дорівнює 170 кг/м<sup>3</sup>.

З проведених досліджень можна зробити висновок, що найліпшим комплексом експлуатаційних властивостей володіють гранульовані матеріали, отримані під дією НВЧ-випромінювання при потужності 650 Вт. Необхідна тривалість такої термообробки складає 6–7 хв.

Найбільш близькими до них за коефіцієнтом спучення є матеріали, отримані при конвективному нагріві при температурі 200 °С впродовж 1 год, але фізико-механічні властивості їх значно нижчі.

**Висновки.** Таким чином, можна сказати, що особливістю НВЧ-нагріву РСК є те, що частина енергії електромагнітного випромінювання перетворюється на теплоту, яка сприяє інтенсивному спученню матеріалу, а інша її частина направлена на структурні зміни в матеріалі, які призводять до поліпшення його властивостей, що пов'язано з ефектом нетеплової дії НВЧ-випромінювання. Механізм нетеплової дії НВЧ електромагнітних коливань на структуру РСК можна пояснити так: НВЧ електромагнітне поле викликає послаблення

міжмолекулярних сил, при цьому молекули води безперервно змінюють орієнтацію, утворюючи електричне поле, збільшуються теплові коливання і зростає інтенсивність крутильних коливань, що створює додаткові енергетичні можливості для утворення нових міжмолекулярних взаємодій, а саме інтенсивної полімеризації РС і встановлення додаткових поперечних зв'язань, що підвищує міцність матеріалу.

З проведених досліджень можна зробити висновок, що із застосуванням НВЧ-випромінювання вдається отримати гранульовані ТІМ з кращим комплексом експлуатаційних властивостей при більш низьких енергетичних витратах на їх виробництво.

### Список використаних джерел

1. Иванов М. Ю. Разработка технологий управления поровой структурой зернистых теплоизоляционных материалов на основе силикат-натриевых композиций. *Системы. Методы. Технологии*. 2014. № 2 (22). С. 102–107.
2. Собченко В. В. Розробка енергозберігаючої технології виробництва пористих заповнювачів із гідросилікатів в апаратах псевдозрідженого шару: автореф. дис... канд. техн. наук. Київ, 2006. 22 с.
3. Тарасова И. Д. Низкотемпературный синтез жидкого стекла и получение теплоизоляционных материалов на его основе: автореф. дисс... канд. техн. наук. Белгород, 2005. 20 с.
4. Развитие производства эффективного минерального теплоизоляционного материала «БИСИПОР» / О. В. Крифукс и др. *Строительные материалы*. 2003. № 11. С. 26–27.
5. Меркин А. П. Сверхлегкий минеральный гранулированный материал – стеклопор. *Строительные материалы*. 1976. № 9. С. 10–12.
6. Горлов Ю. П. Технологии теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. Москва: Высш. шк., 1989. 384 с.
7. Юцис И. И. Новое технологическое оборудование для производства теплоизоляционных материалов. Москва: Стройиздат, 1985. 36 с.
8. Кудяков А. И., Свергунова Н. А., Иванов М. Ю. Зернистый теплоизоляционный материал на основе модифицированной жидкостекольной композиции: монография / под ред. А. И. Кудякова. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010. 204 с.
9. Лотов В. А., Кутугин В. А. Формирование пористой структуры пеносиликатов на основе жидкостекольных композиций. *Стекло и керамика*. 2008. № 1. С. 6–10.
10. Страхов А. В. Теплоизоляционный материал на основе силикатнатриевого связующего, модифицированного активными минеральными добавками: автореф. дис... канд. техн. наук: Саратов, 2011. 22 с.
11. Сапоровская Т. Ю. Исследование конструкционно-теплоизоляционного бетона на основе силикатного гранулированного заполнителя: автореф. дис... канд. техн. наук. Владимир, 2000. 20 с.

12. Заболотская А. В. Технология и физико-химические свойства пористых композиционных материалов на основе жидкого стекла и природных силикатов: автореф. дис... канд. техн. наук. Томск, 2003. 20 с.
13. Ванецев А. С., Третьяков Ю. Д. Микроволновый синтез индивидуальных и многокомпонентных оксидов. *Успехи химии*. 2007. № 76 (5) С. 435–453.
14. Małachowska A., Stachowicz M., Granat K. Innovative microwave hardening of water-glass containing sandmixes in technical-economic approach. *Archives of foundry engineering*. 2012. № 12. P. 75–80.
15. Granat K., Nowak D., Pigieli M., Stachowicz M., Wikiera R. Microwaves energy in curing process of water glass molding sands. *Archives of foundry engineering*. 2007. № 7. P. 183–188.
16. Евсина Н. А. Анализ способов сушки капиллярно-пористых материалов и методов их автоматизации. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*: сб. науч. тр. Темат. вып.: Автоматика и приборостроение. Харьков: НТУ «ХПИ». 2011. № 57. С. 88–91.
17. Морозов О. Г., Самигуллин Р. Р., Насыбуллин А. Р. Микроволновые технологии в процессах переработки и утилизации бытовых полимерных отходов. *Известия Самарского центра Российской академии наук*. 2010. Т. 12. № 493. С. 580–582.
18. Промышленное применение СВЧ-нагрева / О. Морозов, А. Каргин, Г. Савенко и др. *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2010. № 3. С. 2–6.
19. Лыков А. Л. Теория сушки. Москва: Энегррия, 1968. 472 с.

---

Римар Тетяна Ернстівна, канд. техн. наук, доцент кафедри хімічної інженерії та екології Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, м. Северодонецьк, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9724-8640>. Тел.: +38(050)1521443. E-mail: [rymartatyana1975@gmail.com](mailto:rymartatyana1975@gmail.com).  
Rymar Tatyana PhD (Tech.), Associate Professor of Chemical Engineering and Ecology Department, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9724-8640>.  
Tel.: +38(050)1521443. E-mail: [rymartatyana1975@gmail.com](mailto:rymartatyana1975@gmail.com).

Статтю прийнято 16.02.2021 р.