

УДК 666:973.6.

doi:10.20998/2413-4295.2023.01.13

## НВЧ ТЕХНОЛОГІЯ РІДИННОСКЛЯНИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ГРАНУЛЬОВАНОГО ПРОДУКТУ

**Т. Е. РИМАР**

кафедра хімічної інженерії та екології, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,  
м. Київ, УКРАЇНА  
e-mail: rymartatyana1975@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** У роботі досліджуються властивості рідинноскляних теплоізоляційних виробів, отриманих на основі гранульованих продуктів під дією НВЧ випромінювання. За рахунок об'ємного тепловиділення у товщі рідинноскляної композиції вдається отримати однорідноструктурні матеріали, застосувавши технологію одночасної поризації з об'ємним розширенням і гранул і зв'язуючого. Завдяки об'ємному нагріву і механізму «нетеплової» дії НВЧ випромінювання на оброблювальні об'єкти значно знижується тривалість та температура їх нагріву, а також поліпшуються експлуатаційні властивості виробів. Властивості матеріалів, отриманих за такою технологією порівнюються з властивостями матеріалів, отриманих шляхом зв'язування заздалегідь спучених гранул. Було доведено, що одночасне спучення гранул зі зв'язуючим дозволило отримати матеріали монолітної, рівномірнопористої структури з високими фізико-механічними показниками та на порядок меншими показниками водопоглинання і сорбційної вологості завдяки щільній упаковці гранул і рівномірному розподілу зв'язуючого у міжгранульному просторі. Розроблена технологія виробництва композиційних матеріалів у вигляді теплоізоляційних виробів різної конфігурації шляхом одночасної поризації з об'ємним розширенням гранул і зв'язуючого під дією НВЧ випромінювання дозволяє отримати матеріали з кращим комплексом експлуатаційних характеристик ніж у разі зв'язування заздалегідь спучених гранул при більш низьких енергетичних витратах на їх виробництво оскільки виключає стадію окремого спучення гранул. Отримані композиційні теплоізоляційні матеріали не деформуються і мають досить високу міцність для своєї середньої густини. Вони є практично нестискуваними, а це дуже важливий факт, оскільки стискування теплоізоляційних матеріалів з часом призводить до збільшення його теплопровідності та зниження теплозахисних властивостей конструкції.

**Ключові слова:** НВЧ випромінювання; рідинноскляні теплоізоляційні вироби; експлуатаційні властивості; поризація; об'ємне розширення.

## MICROWAVE TECHNOLOGY OF LIQUID-GLASS HEAT-INSULATING MATERIALS BASED ON A GRANULAR PRODUCT

**T. RYMAR**

Chemical Engineering and Ecology Department, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The paper investigates the properties of liquid glass thermal insulation products obtained on the basis of granular products under the influence of microwave radiation. Due to the volumetric heat release in the thickness of the liquid glass composition, it is possible to obtain homogeneously structured materials by applying the technology of simultaneous porosization with volumetric expansion of both granules and binder. Thanks to volumetric heating and the mechanism of "non-thermal" effect of microwave radiation on the processing objects, the duration and temperature of their heating is significantly reduced, as well as the operational properties of the products are improved. The properties of materials obtained by this technology are compared with the properties of materials obtained by binding pre-swollen granules. It was proved that the simultaneous swelling of granules with a binder made it possible to obtain materials of a monolithic, uniformly porous structure with high physical and mechanical parameters and an order of magnitude lower indicators of water absorption and sorption moisture due to the dense packing of the granules and the uniform distribution of the binder in the intergranular space. The developed technology for the production of composite materials in the form of heat-insulating products of various configurations by means of simultaneous porosization with volume expansion of granules and binding under the action of microwave radiation allows to obtain materials with a better set of operational characteristics than in the case of binding pre-swollen granules at lower energy costs for their production because it excludes the stage of separate swelling of the granules. The resulting composite thermal insulation materials do not deform and have a fairly high strength for their average density. They are practically incompressible, and this is a very important fact, since the compression of heat insulating materials over time leads to an increase in its thermal conductivity and a decrease in the heat-shielding properties of the structure.

**Keywords:** Microwave radiation; liquid glass thermal insulation products; operational properties; porosization; volume expansion.

### Вступ

Світовий досвід засвідчує, що економія паливно-енергетичних ресурсів є стратегічним завданням будь-якої держави, а одним з найбільш

ефективних шляхів його вирішення є скорочення втрат теплової енергії крізь огорожувальні конструкції будівель і споруд, промислового обладнання і трубопроводів. У цих умовах істотно зростає роль теплової ізоляції обладнання і

трубопроводів як чинника, що сприяє економії енергії, забезпечує потрібний режим в ізольованих системах і допустимі санітарно-гігієнічні умови праці у виробничих приміщеннях. Проте теплова ізоляція може повністю відповідати своєму призначенню лише за умови її правильного вибору [1].

Переважає більшість процесів хімічної, нафтохімічної, нафтопереробної, харчової, теплоенергетичної та інших галузей промисловості відбувається за температур, відмінних від температури навколишнього середовища. Тому актуальним є розробка термостійких теплоізоляційних матеріалів для енергетичного устаткування і трубопроводів [1].

Відповідно до вимог ДСТУ-Н Б А.3.1-29:2015 для теплоізоляційного шару обладнання і трубопроводів з позитивними температурами речовин, що містяться в них, для всіх способів прокладок, крім безканальної, слід застосовувати матеріали та вироби з середньою густиною не більше  $400 \text{ кг/м}^3$  і теплопровідністю не більше  $0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  (при температурі  $25\text{°C}$  і вологості, зазначеної у відповідних державних стандартах і технічних умовах на матеріали та вироби). Для ізоляції поверхонь з температурою вище  $400\text{°C}$  в якості першого шару допускається застосування виробів з теплопровідністю більше  $0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ . Для теплоізоляційного шару трубопроводів з позитивною температурою при безканальній прокладці слід застосовувати матеріали із середньою густиною не більше  $600 \text{ кг/м}^3$  і теплопровідністю не більше  $0,13 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  (при температурі  $20\text{°C}$  і вологості, зазначеної у відповідних державних стандартах і технічних умовах). Конструкція теплової ізоляції трубопроводів для безканальної прокладки повинна мати міцність на стиск не менше  $0,4 \text{ МПа}$ . Теплоізоляційні конструкції слід передбачати з матеріалів, що забезпечують: тепловий потік через ізольовані поверхні обладнання і трубопроводів відповідно до заданого технологічного режиму або нормованої середньої густини теплового потоку; виключають виділення в процесі експлуатації шкідливих, пожежонебезпечних і вибухонебезпечних, з неприємним запахом речовин в кількостях, що перевищують гранично допустимі концентрації; виключають виділення у процесі експлуатації хвороботворних бактерій, вірусів і грибків [2].

Даним вимогам задовольняють теплоізоляційні матеріали (ТІМ) на основі рідинного скла (РС). Вони мають ряд переваг в порівнянні з іншими ТІМ: висока екологічність – відсутність деполімеризації матеріалу і виділення токсичних речовин в атмосферу; довговічність – мінеральна основа ТІМ довговічніша за синтетичну органічну; негорючість - обумовлена наявністю компонентів, що не окислюються; стійкість до біологічної дії, що особливо важливо при використанні ТІМ у замкненому невентильованому просторі. Відсутність органіки дозволяє гарантовано уникнути ситуацій, пов'язаних з руйнуванням і

деструкцією ТІМ під впливом біологічно активного середовища. Дані матеріали практично не піддаються окисленню, оскільки містять вищі оксиди кремнію.

Композиційні матеріали на основі РС у вигляді різних теплоізоляційних виробів зазвичай отримують на основі гранульованих продуктів за допомогою різних зв'язуючих (рис. 1) [3].

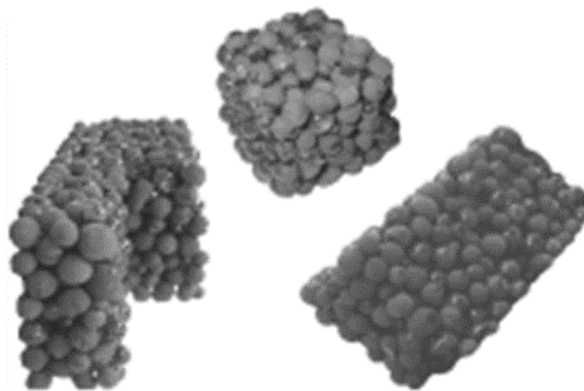


Рис. 1 – Теплоізоляційні вироби на основі гранульованого продукту

Такі матеріали виготовляють шляхом склеювання спучених гранул зв'язуючим. Таким чином отримують, наприклад, склосилікат. Зв'язуючим при виготовленні склосиліката є рідинне скло або його суміш із спеціальними добавками. Об'ємна маса крупнопористого склосиліката знаходиться в межах  $80\text{--}140 \text{ кг/м}^3$ , міцність при стиску -  $0,15\text{--}0,4 \text{ МПа}$ , теплопровідність –  $0,05\text{--}0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  [4,5].

Однак міцність склеювання гранул зв'язуючим недостатньо висока, через що такі матеріали ламаються у місцях контакту гранул навіть при невеликих прикладених зусиллях.

Вказану проблему можна розв'язати застосувавши технологію додаткової поризації зв'язуючого. Завдяки спученню зв'язуючого за допомогою газоутворювача, а не лише за рахунок виділення води, воно рівномірно розподіляється у міжгранульному просторі. Таким чином формується монолітна структура виробів, в якій простір між гранулами заповнено поризованим зв'язуючим.

Процес отримання композиційних матеріалів може здійснюватися як при температурі навколишнього середовища (за допомогою пороутворювача, що штучно вводиться у сировинну композицію), так і за підвищених температур (де пороутворювачем виступає силанольна або водневопов'язана молекулярна вода, що виділяється при нагріванні до  $300\text{--}500\text{°C}$ ).

Перевагами матеріалів, отриманих шляхом термоспучення є їх висока міцність при більш низькій середній густині та гігроскопічності.

Дослідженнями таких матеріалів займалися вчені багатьох країн світу. Однак висока температура отримання матеріалів, багатокомпонентний склад та

багатостадійність даних технологій обмежують їхнє широке впровадження у галузі теплоізоляційних матеріалів.

Так, наприклад, у роботі [6] наводиться спосіб виготовлення композиту з піноскла, що включає подрібнення вихідного матеріалу, його сортування виділення частинок заданого розміру, гранулювання подрібнених частинок. Гранули попередньо нагрівають і пропускають через високотемпературне полум'я для спінування. Температура полум'я становить щонайменше 1300°C. Потім спінені гранули змішують із портландцементом та водою для отримання композитного матеріалу.

У дослідженні [7] отримання теплоізоляційного матеріалу проводилось на основі неорганічного зв'язуючого рідинного скла з додаванням гончарної глини та спучених при температурі 700°C-1250°C частинок перліту. Суміш зв'язуючого з спученим перлітом поміщають до прес-форми та витримують під тиском до 18–50 МПа при температурі 70°C–245°C протягом 15–60 хвилин.

Спосіб отримання піносилікатів у роботі [8] включає наступні стадії: змішування кремнезему з рідинним склом до отримання однорідного золю, сушіння одержаного золю з отриманням гелю, подрібнення гелю та заливання його в сталеву форму, нагрівання для спучення до температури 300-600 °C.

Автори публікації [9] запропонували виготовляти теплоізоляційні матеріали на основі склобою з додаванням розчинних силікатів шляхом спінування при температурі 850°C.

До складу композиції для виготовлення теплоізоляційного матеріалу в роботі [10] входять рідинне натрієве скло, отверджувач на основі сполук, що виділяють кислоту в воду, піноутворювач, наповнювач та вода. Компоненти композиції перед змішуванням готують роздільно, шляхом попереднього нагріву рідинного скла і замочування довговолокнистого наповнювача у воді, підготовки піни з піноутворювального розчину, який починають вводити в момент попереднього змішування рідинного скла, суспензії наповнювача і отверджувача. Спінування композиції проводять під дією електромагнітного випромінювання з частотою коливань від 434 до 9100 МГц протягом 30–120 хв.

У роботі [11] теплоізоляційні піни отримують шляхом спікання суміші силікату натрію з добавкою золи-винесення, обробленою кислотою, при 450 °C протягом 0,5 год в муфельній печі. Попередня обробка летючої золи кислотою дозволяє видалити шкідливі перехідні метали та лужні домішки та призводить до покращення фізичних властивостей. У публікації [12] для отримання теплової ізоляції проводять спікання розчину силікату натрію з борною кислотою при температурі 450–500 °C. Щоб вирішити проблеми низької в'язкості та погані стабільності спінених матеріалів із силікагелю, спінений силікагель в роботі [13] був приготований з використанням композитного піноутворювача,

стабілізатора піни, розчину силікату натрію та оцтової кислоти.

У статті [14] були отримані пінопласти силікатної високопористої кераміки шляхом прямого спінування змішаними поверхнево-активними речовинами. У роботі для виробництва рідинноскляних ТІМ пропонується сучасна НВЧ технологія, яка в порівнянні з розглянутими, дозволяє отриманий матеріал при вихідній суміші, до складу якої входить мінімальна кількість компонентів; значно знизити температуру і тривалість спучення РСК; спростити технологію, об'єднавши стадії спучення гранул і зв'язуючого.

Відмінною особливістю НВЧ діелектричного нагріву від двох інших, фізично можливих способів нагріву – кондуктивного (від грюючої стінки) або конвективного (гарячим потоком теплоносія, повітрям наприклад) є об'ємність тепловиділення в діелектричному середовищі, що нагрівається [15].

Тобто, за рахунок об'ємного тепловиділення в товщі РСК можна розв'язати проблему отримання якісних теплоізоляційних виробів на основі гранульованих продуктів, оскільки вдається застосувати технологію одночасної поризації з об'ємним розширенням і гранул і зв'язуючого.

#### Мета роботи

Дослідження впливу НВЧ випромінювання на властивості теплоізоляційних матеріалів, отриманих шляхом одночасної поризації з об'ємним розширенням гранул і зв'язуючого та шляхом зв'язування заздалегідь спучених гранул.

#### Виклад основного матеріалу

Спучення при НВЧ нагріві гранульованого напівфабрикату разом із РС зв'язуючим в замкнутому просторі дозволяє отримувати теплоізоляційні вироби із заданою геометричною формою і розмірами. При такому способі формується однорідна дрібнопориста структура всередині виробів, в якій простір між гранулами заповнено спученим зв'язуючим, обмеженим більш щільним поверхневим шаром (рис. 2). Крім того, процес можна проводити за більш низьких температур ніж при традиційному конвективному нагріві, а тривалість процесу значно скорочується, завдяки цілеспрямованим витратам енергії [16].

Рідинноскляна композиція, що використовується для виготовлення теплоізоляційних матеріалів, містить: як основний компонент – рідинне натрієве скло, як модифікатори коагуляційно-кристалізаційних процесів – оксид цинку і напівводний гіпс, як пороутворювач – пероксид водню, як піностабілізатор – оксиетильований алкілфенол. Як гранульований заповнювач використовуються неспучені гранули на основі РС і оксиду цинку [17,18].

**Обговорення результатів**

Для визначення ефективності того чи іншого способу виготовлення теплоізоляційних виробів були проведені дослідження зі спучення зразків при різних вихідних потужностях НВЧ випромінювання. На рис. 3 показана залежність коефіцієнта спучення (а) і середньої густини (б) від потужності НВЧ випромінювання.



Рис. 2 – Теплоізоляційні вироби на основі гранульованого продукту отримані під дією НВЧ випромінювання

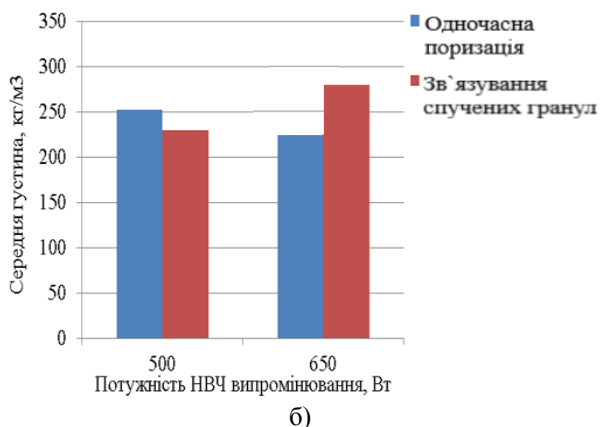
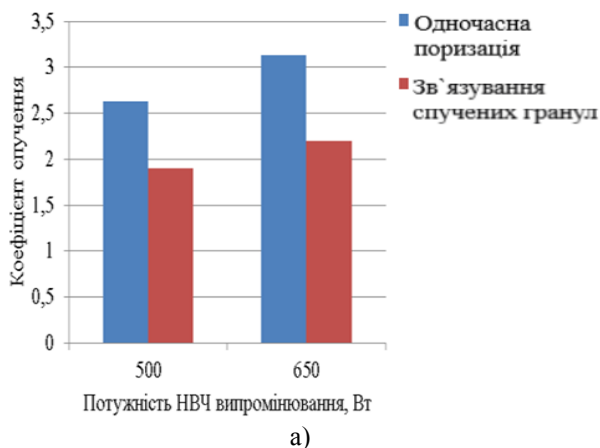


Рис. 3 – Залежність коефіцієнта спучення (а) і середньої густини (б) композиційного матеріалу від потужності НВЧ випромінювання

Виходячи з даних рис. 3 (а), при одночасній поризації композиційного матеріалу коефіцієнт спучення при максимальній потужності НВЧ випромінювання 650 Вт є найвищим і дорівнює ~3,0 в порівнянні з матеріалом, отриманим шляхом зв'язування заздалегідь спучених гранул, при якому коефіцієнт спучення становить ~2,2. Так, при одночасному спученні гранульованого заповнювача і зв'язуючого утворюється рівномірна пориста структура, оскільки в процесі поризації гранули склеюються між собою, а міжгранульний простір рівномірно заповнюється поризованим зв'язуючим.

При зв'язуванні заздалегідь спучених гранул рівномірне заповнення міжгранульного простору ускладнюється сферичною формою гранул і їх практично гладкою поверхнею, внаслідок чого спостерігається низька адгезія зв'язуючого до гранульованого заповнювача, невпорядкований розподіл гранул в шарі зв'язуючого, і осідання спученої маси.

Дані рис. 3 (б) говорять, що при спученні композиційних матеріалів шляхом одночасної поризації вдається досягти більш низької середньої густини матеріалу (220-240 кг/м<sup>3</sup> при потужності НВЧ випромінювання 650 Вт) завдяки рівномірному вивільненню молекулярно зв'язаної води в процесі спучення зі структури і гранул, і зв'язуючого. В результаті вдається отримати переважно дрібнопористу структуру замкненого типу.

Як зазначалося раніше, при зв'язуванні заздалегідь спучених гранул спостерігається слабка адгезія між зв'язуючим і спученим гранульованим заповнювачем, що призводить не тільки до осідання спученої системи і підвищення середньої густини, а й до крихкості зразків і зниження їх міцності. Крім того, для досягнення монолітної структури необхідно застосовувати більш високу кількість зв'язуючого, ніж при одночасній поризації, що також призводить до обтяжування зразка. При потужності мікрохвильового випромінювання 650 Вт середня густина таких матеріалів становить 270–290 кг/м<sup>3</sup>.

На рис. 4 наведені характеристики водопоглинання і сорбційної вологості при отриманні композиційних матеріалів при різних потужностях НВЧ-випромінювання.

Як видно з рис. 4, при збільшенні потужності НВЧ випромінювання здатність РСК до поризації зростає, при спученні збільшується пористість матеріалу, отже, показники водопоглинання і сорбційної вологості також зростають, як для одночасної поризації, так і для матеріалів, отриманих на основі вже спучених гранул. При зміні потужності НВЧ випромінювання від 500 до 650 Вт водопоглинання збільшується від 150 % до 240 %, гігроскопічність зростає від 23 до 33 % для матеріалів, отриманих шляхом зв'язування заздалегідь спучених гранул. При одночасному спученні гранул і зв'язуючого, при збільшенні НВЧ потужності водопоглинання змінюється від 25 до

30 %, сорбційна вологість практично не змінюється і складає 4-5 %, тобто дані показники на порядок менше, ніж у разі зв'язування вже спучених гранул. Нерівномірний розподіл гранул в шарі зв'язуючого, утворення великих порожнеч і пор, які схлопуються, при зв'язуванні спучених гранул призводять до низького опору матеріалу дії води та її пари, що негативно позначається на його теплоізоляційних властивостях.

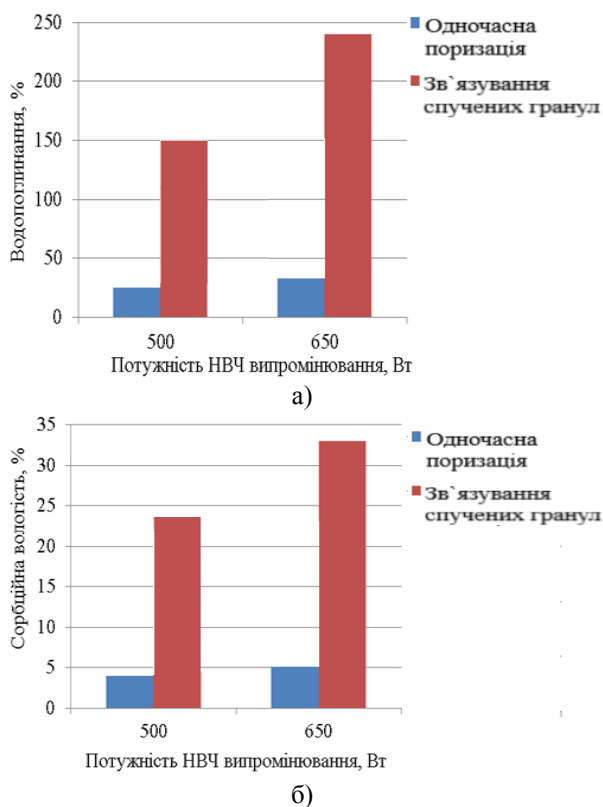


Рис. 4 – Залежність водопоглинання (а) і сорбційної вологості (б) композиційного матеріалу від потужності НВЧ випромінювання

Властивості міцності композиційних матеріалів, при різних потужностях НВЧ випромінювання, наведені на рис. 5.

Як видно з даних рис. 5, виготовлення композиційних матеріалів шляхом одночасної поризації передбачає їх отримання з більш високою міцністю, ніж при зв'язуванні заздалегідь спучених гранул при близьких значеннях середньої густини, які при потужності мікрохвильового випромінювання 650 Вт складають 220–240 кг/м<sup>3</sup> і 270–290 кг/м<sup>3</sup> для одночасної поризації і для зв'язування спучених гранул відповідно. При одночасному спученні сирих гранул і зв'язуючого міцність на згин становить 0,75–0,85 МПа. У той же час при виготовленні матеріалів шляхом змішування зв'язуючого зі спученим гранульованим заповнювачем – 0,55–0,65 МПа. Нерівномірна структура матеріалу, усадкові явища, а також утворення великих пор призвели до зниження міцності зразків. Також вище значення для зразків,

отриманих шляхом одночасної поризації, має показник міцності на стиск, який становить 0,6–0,7 МПа при потужності 650 Вт. При зв'язуванні вже спучених гранул було отримано матеріал з міцністю на стиск 0,4–0,5 МПа. Отже одночасне спучення гранул зі зв'язуючим дозволило отримати матеріали монолітної, рівномірнопористої структури з високими фізико-механічними показниками та на порядок меншими показниками водопоглинання і сорбційної вологості завдяки щільній упаковці гранул і рівномірному розподілу зв'язуючого у міжгранульному просторі.

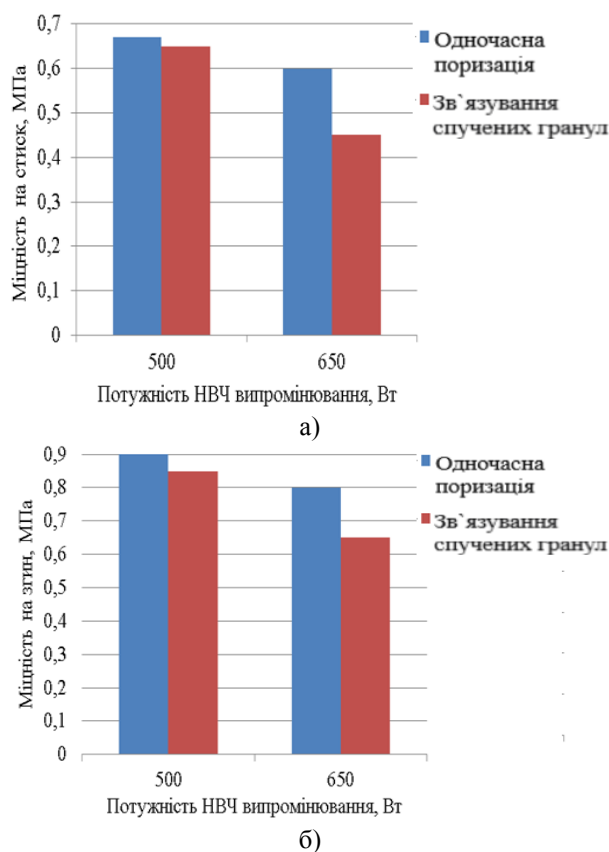


Рис. 5 – Залежність міцності композиційного матеріалу на стиск (а) і на згин (б) від потужності НВЧ випромінювання

## Висновки

Розроблена технологія виробництва композиційних матеріалів у вигляді теплоізоляційних виробів різної конфігурації шляхом одночасної поризації з об'ємним розширенням гранул і зв'язуючого під дією НВЧ випромінювання дозволяє отримати матеріали з кращим комплексом експлуатаційних характеристик ніж у разі зв'язування заздалегідь спучених гранул при більш низьких енергетичних витратах на їх виробництво оскільки виключає стадію окремого спучення гранул.

Отримані композиційні теплоізоляційні матеріали не деформуються і мають досить високу

міцність для своєї середньої густини. Вони є практично нестикуваними, а це надважливий факт, оскільки стискування ТІМ з часом призводить до збільшення його теплопровідності і зниження теплозахисних властивостей конструкції. Така теплоізоляція забезпечує: значну економію палива, сприяє збільшенню потужності теплових агрегатів і підвищенню їх ККД, інтенсифікацію технологічних процесів, зниження витрати основних матеріалів. Теплоізоляція промислових установок та трубопроводів, що працюють при високих температурах, сприяє створенню нормальних санітарно-гігієнічних умов праці обслуговуючого персоналу в гарячих цехах і запобіганню виробничого травматизму.

#### Список літератури

1. Мікульонюк І. О. *Проектування теплової ізоляції обладнання і трубопроводів: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.]*. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. 188 с.
2. ДСТУ-Н Б А.3.1-29:2015. Магістральні трубопроводи. Нанесення захисних покривів та улаштування теплової ізоляції. *Настанова*.
3. Кудяков А. И., Свергунова Н. А., Иванов М. Ю. *Зернистый теплоизоляционный материал на основе модифицированной жидкостекольной композиции: монография*. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010. 204 с.
4. Горлов Ю. П. *Технологии теплоизоляционных и акустических материалов и изделий*. Москва: Высш. шк., 1989. 384 с.
5. Матеріал теплоізоляційний: види, властивості, застосування. URL: <https://dailyday.com.ua/mix/material-teploizolyatsijnij-vidi-vlastivosti-zastosuvannya.html>. (дата звернення: 03.12.2022).
6. Ramsey Gene W. *Foamed glass ceramic composite material and a method of producing the same*: pat. US009376344B2, Unated States: Int. Cl. C04B 14/24, C04B 18/14, C04B 28/04, C04B 38/08. Date of patent: Jun. 28, 2016. 6.
7. Inorganic fireproof and heat-insulating material based article thereof: pat. 9708536B2 Unated States: int. C09K21/02, E04B1/80. Date of patent: 18.07.2017.
8. Method to produce foam silicates with admixtures having magnetic properties and foam silicate thus produced: pat. WO 2016056932 A1: int. C04B35/16, C04B35/624, C04B38/00. Date of patent: 14.04.2016.
9. Ayadi A., Stiti N., Benhaoua F., Boumchedda K., Lerari Y. Elaboration and Characterization of Foam Glass Based on Cullet With Addition Of Soluble Silicates. *AIP Conference Proceedings* 1315. 1505. 2011. doi: <https://doi.org/10.1063/1.3552401>.
10. Method for manufacturing a heat-insulating material: pat. WO 2012121619: int. C04B38/10, C04B40/00. № PCT/RU2011/000385; заявл. 2.06.2011; опубл. 13.09.2012. 18 с.
11. Siqian Zhang, Yu-Ri Lee, Ji-Whan Ahn, Wha-Seung Ahn. Sodium silicate insulating foam reinforced with acid-treated fly ash. *Materials Letters*. 2018. V. 218. P. 56–59. doi: 10.1016/j.matlet.2018.01.150.
12. Ye Li, Xudong Cheng, Wei Cao, Lunlun Gong, Ruifang Zhang, Heping Zhang. Development of adiabatic foam using sodium silicate modified by boric acid. *Journal of alloys and*

- compounds*. 2016. V. 666. P. 513–519. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.01.139.
13. Gong Yawen, Liu Yingchun, Jing Mingju, Zhang Yingnan, Zhang Bin. Preparation and flame retardant properties of silica gel foam. *China Safety Science Journal*. 2022. V. 32. P. 127-133. doi: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2022.05.0114.
14. Zhongpei Du, Dongxu Yao, Yongfeng Xia, Kaihui Zuo, Jinwei Yin, Hanqin Liang, Yu-Ping Zeng. Highly porous silica foams prepared via direct foaming with mixed surfactants and their sound absorption characteristics. *Ceramics International*. 2020. V. 46. P. 12942–12947. doi: [j.ceramint.2020.02.063](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.02.063).
15. Достанко А. П., Бордусов С. В., Свядковский И. В. *Плазменные процессы в производстве электронной техники*. Минск: ФУА информ, 2001. 244 с.
16. Rymar T. Determining the technological mode of foaming of blocked heat – insulating material based on liquid glass in microwave equipment. *Functional materials*. 2018. Vol. 25. № 2. P. 376–380. doi: 10.15407/fm25.02.376.
17. Rymar T., Tatarchenko H., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P., Beran M., Burlutskyy O. The Study of Manufacturing Thermal Insulation Materials Based on Inorganic Polymers under Microwave Exposure. *Polymers*. 2022. Vol. 14. Iss. 15, 3202. doi: 10.3390/polym14153202.
18. Rymar T., Suvorin O., Rodin L. Study of structuring processes in lsquide glass compositions based on inorganic polymers under microwave radiation in the production of heat-insulating materials. *Functional materials*. 2022. Vol. 29. № 3. P. 364–370. doi: 10.15407/fm29.02.364.

#### References (transliterated)

1. Mikulonok I. O. *Proektuvannia teplovoi izoliatsii obladnannia i truboprovodiv [Design of thermal insulation of equipment and pipelines]: pidruch. [dlia stud. vyshch. navch. zakl.]*. Kyiv, 2013. 188.
2. DSTU-N B A.3.1-29:2015. *Mahistralni truboprovody. Nanessennia zakhysnykh pokryviv ta ulashuvannia teplovoi izoliatsii. Nastanova. [Main pipelines. Application of protective coatings and installation of thermal insulation. Ceasing]*.
3. Kudiakov A. Y., Sverhunova N. A., Yvanov M. Iu. *Zernystyi teployzoliatsyionnyi materyal na osnove modyfytsyrovannoi zhydkostekolnoi kompozytsyy [Granular heat-insulating material based on a modified liquid glass composition]: monohrafyia*. Tomsk, 2010. 204.
4. Horlov Yu. P. *Tekhnolohyy teployzoliatsyionnykh y akustycheskykh materyalov y yzdeliy. [Technologies of heat-insulating and acoustic materials and products]*. Moskwa, 1989. 384.
5. Material teploizoliatsiinyi: vydy, vlastyvoli, zastosuvannia. Available at: <https://dailyday.com.ua/mix/material-teploizolyatsijnij-vidi-vlastivosti-zastosuvannya.html>. (accessed 03.12.2022).
6. Ramsey Gene W. *Foamed glass ceramic composite material and a method of producing the same*: pat. US009376344B2, Unated States: Int. Cl. C04B 14/24, C04B 18/14, C04B 28/04, C04B 38/08. Date of patent: Jun. 28, 2016. 6.
7. Inorganic fireproof and heat-insulating material based article thereof: pat. 9708536B2 Unated States: int. C09K21/02, E04B1/80. Date of patent: 18.07.2017.

8. Method to produce foam silicates with admixtures having magnetic properties and foam silicate thus produced: pat. WO 2016056932 A1: int. C04B35/16, C04B35/624, C04B38/00. Date of patent: 14.04.2016.
9. Ayadi A., Stiti N., Benhaoua F., Boumchedda K., Lerari Y. Elaboration And Characterization Of Foam Glass Based On Cullet With Addition Of Soluble Silicates. *AIP Conference Proceedings*, 2011, 1315, 1505, doi: 10.1063/1.3552401.
10. Method for manufacturing a heat-insulating material: pat. WO 2012121619: int. C04B38/10, C04B40/00. № PCT/RU2011/000385; stat. 2.06.2011; publ. 13.09.2012, 18.
11. Siqian Zhang, Yu-Ri Lee, Ji-Whan Ahn, Wha-Seung Ahn. Sodium silicate insulating foam reinforced with acid-treated fly ash. *Materials Letters*, 2018, vol. 218, pp. 56–59, doi: 10.1016/j.matlet.2018.01.150.
12. Ye Li, Xudong Cheng, Wei Cao, Lunlun Gong, Ruifang Zhang, Heping Zhang. Development of adiabatic foam using sodium silicate modified by boric acid. *Journal of alloys and compounds*, 2016, vol. 666, pp. 513–519, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.01.139.
13. Gong Yawen, Liu Yingchun, Jing Mingju, Zhang Yingnan, Zhang Bin. Preparation and flame retardant properties of silica gel foam. *China Safety Science Journal*, 2022, vol. 32, pp. 127–133, doi: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2022.05.0114.
14. Zhongpei Du, Dongxu Yao, Yongfeng Xia, Kaihui Zuo, Jinwei Yin, Hanqin Liang, Yu-Ping Zeng. Highly porous silica foams prepared via direct foaming with mixed surfactants and their sound absorption characteristics. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, pp. 12942–12947, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.02.063.
15. Dostanko A. P., Bordusov S. V., Svadkovskiy Y. V. *Plazmennse protsessy v proyzvodstve elektronnoi tekhniky*. Minsk. 2001, 244 p.
16. Rymar T. Determining the technological mode of foaming of blocked heat – insulating material based on liquid glass in microwave equipment. *Functional materials*, 2018, vol 25, no. 2, pp. 376–380, doi: 10.15407/fm25.02.376.
17. Rymar T., Tatarchenko H., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P., Beran M., Burlutskyy O. The Study of Manufacturing Thermal Insulation Materials Based on Inorganic Polymers under Microwave Exposure. *Polymers*, 2022, vol. 14. Iss. 15, 3202, doi: 10.3390/polym14153202.
18. Rymar T., Suvorin O., Rodin L. Study of structuring processes in liquid glass compositions based on inorganic polymers under microwave radiation in the production of heat-insulating materials. *Functional materials*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 364–370, doi: 10.15407/fm29.02.364.

#### Відомості про авторку (About author)

**Рymar Тетяна Ернстівна** – доктор технічних наук, доцент, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, професор кафедри хімічної інженерії та екології, м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9724-8640>; e-mail: [rymartatyana1975@gmail.com](mailto:rymartatyana1975@gmail.com).

**Рymar Татяна** – Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University; Professor of Chemical Engineering and Ecology Department; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9724-8640>. Tel.: +38(050)1521443. E-mail: [rymartatyana1975@gmail.com](mailto:rymartatyana1975@gmail.com).

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Рymar Т. Е. НВЧ технологія рідинноскляних теплоізоляційних матеріалів на основі гранульованого продукту. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 1 (15). С. 95-101. doi:10.20998/2413-4295.2023.01.13.

*Please cite this article as:*

Rymar T. Microwave technology of liquid-glass heat-insulating materials based on a granular product. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 1(15), pp. 95-101, doi:10.20998/2413-4295.2023.01.13.

*Надійшла (received) 24.01.2023  
Прийнята (accepted) 10.03.2023*