

*Т. Е. РИМАР*

## **ЗАСТОСУВАННЯ НВЧ УСТАНОВОК ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ФОРМОВИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ВИРОБІВ НА ОСНОВІ РІДИННОГО СКЛА**

У статті проводиться дослідження процесів спучення рідинноскляних композицій та виготовлення теплоізоляційних матеріалів на їх основі при конвективному і НВЧ нагріві. В роботі було встановлено, що характер кривих спучення рідинноскляних композицій в умовах НВЧ випромінювання і конвективного нагріву значно відрізняються. Так при конвективному нагріві має місце наявність індукційного періоду, але потім швидкість різко зростає і далі процес поступово затухає. У разі НВЧ випромінювання індукційний період відсутній, і процес з самого початку йде з великою швидкістю, а потім у міру зменшення концентрації газоутворюючих речовин сповільнюється. На відміну від процесу спучення під дією НВЧ випромінювання, при конвективному нагріві процес проходить рівномірно з поступовим виділенням води внаслідок чого відбувається переважно сушка матеріалу, а не його спучення. Порівняльний аналіз процесів спучення рідинноскляних композицій при конвективному і НВЧ нагріві показав більш високу ефективність спучення за допомогою НВЧ випромінювання. Необхідна тривалість такої термообробки складає 8-10 хв. Найбільш близькими до таких матеріалів за коефіцієнтом спучення є матеріали, отримані при конвективному нагріві при температурі 300 °С, тривалість такого нагріву триває понад 15 хв. До того ж розрахований ККД НВЧ установки майже в два рази перевищує ККД сушильної установки, так для НВЧ-установки він складає 0,79, а сушильної установки - всього 0,46. Отже, під дією НВЧ випромінювання можна виготовляти ефективні теплоізоляційні матеріали на основі рідинного скла при більш низьких температурах та впродовж значно меншого часу термообробки, в порівнянні з традиційним конвективним нагрівом. В роботі наводяться промислові НВЧ-установки, які можуть бути використані для проведення процесу спучення. Це камерні НВЧ-установки періодичної дії, які застосовують переважно для сушки або нагріву виробів великого розміру.

**Ключові слова:** конвективний нагрів, НВЧ випромінювання, рідинноскляні композиції, теплоізоляційні матеріали, коефіцієнт спучення, коефіцієнт корисної дії.

*Т. Е. RYMAR*

## **APPLICATION OF UHF INSTALLATIONS FOR THE MANUFACTURE OF MOLDED THERMAL INSULATION PRODUCTS BASED ON LIQUID GLASS.**

The article investigates the processes of swelling of liquid-glass compositions and the production of heat-insulating materials based on them under convective and microwave heating. In the work, it was established that the nature of the swelling curves of liquid-glass compositions under the conditions of microwave radiation and convective heating are significantly different. Thus, during convection heating, there is an induction period, but then the speed increases sharply and then the process gradually slows down. In the case of microwave radiation, there is no induction period, and the process proceeds at a high speed from the very beginning, and then slows down as the concentration of gas-forming substances decreases. In contrast to the swelling process under the influence of microwave radiation, during convective heating, the process proceeds uniformly with gradual release of water, as a result of which the material is mostly dried, and not swollen. A comparative analysis of the processes of swelling of liquid-glass compositions under convective and microwave heating showed a higher efficiency of swelling with the help of microwave radiation. The necessary duration of such heat treatment is 8-10 minutes. The materials obtained by convective heating at a temperature of 300 °C are the closest to such materials in terms of the swelling coefficient, the duration of such heating lasts more than 15 minutes. In addition, the calculated efficiency of the microwave installation is almost two times higher than the efficiency of the drying installation, for example, it is 0.79 for the microwave installation, and only 0.46 for the drying installation. Therefore, under the influence of microwave radiation, it is possible to produce effective heat-insulating materials based on liquid glass at lower temperatures and during a significantly shorter heat treatment time, compared to traditional convective heating. The work presents industrial microwave installations that can be used for the swelling process. These are chamber microwave installations of periodic action, which are used mainly for drying or heating large-sized products.

**Key words:** convective heating, microwave radiation, liquid glass compositions, thermal insulation materials, coefficient of swelling, coefficient of useful action.

*Т. Э. РЫМАР*

## **ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ УСТАНОВОК ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОРМОВЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО СТЕКЛА**

В статье проводится исследование процессов вспучивания жидкостекляных композиций и изготовление теплоизоляционных материалов на их основе при конвективном и СВЧ нагреве. В работе было установлено, что характер кривых вспучивания жидкостекляных композиций в условиях СВЧ излучения и конвективного нагрева значительно отличаются. Так при конвективном нагреве имеет место наличие индукционного периода, но затем скорость резко возрастает и далее процесс постепенно затухает. В случае СВЧ излучения индукционный период отсутствует, и процесс изначально идет с большой скоростью, а затем по мере уменьшения концентрации газообразующих веществ замедляется. В отличие от процесса вспучивания под действием СВЧ излучения, при конвективном нагреве процесс проходит равномерно с постепенным выделением воды, вследствие чего происходит преимущественно сушка материала, а не его вспучивание. Сравнительный анализ процессов вспучивания жидкостекляных композиций при конвективном и СВЧ нагреве показал более высокую эффективность вспучивания с помощью СВЧ излучения. Требуемая продолжительность такой термообработки составляет 8-10 мин. Наиболее близкими к таким материалам по коэффициенту вспучивания являются материалы, полученные при конвективном нагреве при температуре 300 °С, продолжительность такого нагрева длится более 15 мин. К тому же рассчитанный КПД СВЧ установки почти в два раза превышает КПД сушильной установки, так для СВЧ-установки он составляет 0,79, а для сушильной установки – всего 0,46. Следовательно, под действием СВЧ излучения можно изготавливать эффективные теплоизоляционные материалы на основе жидкого стекла при более низких температурах и значительно меньшем времени термообработки, по сравнению с традиционным конвективным нагревом. В работе приводятся промышленные СВЧ-установки, которые могут быть использованы для проведения процесса вспучивания. Это камерные СВЧ-установки периодического действия, применяемые преимущественно для сушки или нагрева изделий большого размера.

**Ключевые слова:** конвективный нагрев, СВЧ излучение, жидкостекляные композиции, теплоизоляционные материалы, коэффициент вспучивания, коэффициент полезного действия.

**Вступ.** Перспективним теплоізоляційним матеріалом на основі рідинного скла з досить жорсткою структурою є піносілікат. Піносілікат є твердою неорганічною піною, яка в процесі поризації рідинноскляної суміші при термічному нагріві набуває заданих розмірів і форми. Цілеспрямовано змінюючи вміст твердої фази в сировинній суміші шляхом введення різних тонкодисперсних мінеральних наповнювачів, можна отримати піносілікатні вироби з середньою густиною 50-200 кг/м<sup>3</sup>, коефіцієнтом теплопровідності 0,032-0,065 Вт/(м·К) і міцністю при стиску 0,08-1,5 МПа.

Цей матеріал зберігає форму і властивості при нагріванні до 450 °С, біостійок, екологічно чистий. Недоліком його є досить високе водопоглинання, обумовлене значною часткою наскрізної пористості в структурі. Цей недолік усувається при нанесенні на поверхню плит захисних полімерних або неорганічних водостійких покриттів у вигляді суцільної плівки товщиною 0,1-0,5 мм. Особливо легкі види піносілікату з середньою густиною 50-75 кг/м<sup>3</sup> володіють теплопровідністю, яку мають пінопласти, одержувані на основі органічних речовин, проте головна перевага піносілікату полягає в тому, що він є негорючим матеріалом, який зберігає свої властивості до високих температур, оскільки як вихідний матеріал при його отриманні використовуються різні композиції на основі рідинного скла і мінеральних речовин [1].

Існують різні технологічні підходи в отриманні піносілікатів, що принципово відрізняються за процесом газовиділення безпосередньо в товщі сформованої композиції. Причому процес газовиділення при високих температурах може бути заснований як на реакціях спеціальних добавок, так і на виділенні парів кристалізаційної і хімічно зв'язаної води [2-7].

З недоліків матеріалів цього класу слід зазначити підвищену енергоємність процесу, оскільки всі вони протікають за температури 300-800 °С, до того ж композиції для їх виготовлення містять багатокomпонентний склад, а вартість більшості компонентів занадто висока.

Основним стримуючим фактором у виробництві матеріалів на основі рідинного скла є складність отримання теплоізоляційних виробів в плитній та блокувній формі, у формі напівциліндрів, призначених для теплоізоляції трубопроводів, через труднощі рівномірного прогріву внутрішніх шарів великорозмірних зразків. Рівномірного прогріву внутрішніх шарів матеріалу можна досягти застосувавши діелектричний НВЧ нагрів, основною перевагою якого і є можливість об'ємного нагріву сировинних сумішей.

Оскільки, діелектричний нагрів це метод нагріву діелектричних матеріалів змінним в часі електричним полем, то якщо електричне поле змінюється з надвисокою частотою в діапазоні 0,4 - 10 ГГц, то це НВЧ нагрів, якщо з частотою в діапазоні 10 - 100 кГц, то це нагрів струмами високої частоти (СВЧ). Глибина

проникнення електромагнітного поля в діелектричне середовище визначається частотою, чим вище частота, тим менше глибини проникнення і навпаки [8].

Останніми роками спостерігається значне зростання інтересу до практичного використання НВЧ енергії в промислових цілях. НВЧ-обробка дозволяє здійснювати такі технологічні операції як нагрів, сушка, вулканізація і девулканізація, зміцнення і деструкція матеріалів, тощо. Відмінною особливістю діелектричного нагріву від двох інших, фізично можливих способів нагріву - кондуктивного (від гріючої стінки) або конвективного (гарячим потоком теплоносія, повітрям наприклад) є об'ємність тепловиділення в діелектричному середовищі, що нагрівається [9].

Тобто, нагрів продуктів і матеріалів може бути поверхневим (зовнішнім) або об'ємним (внутрішнім). Зовнішнє підведення енергії забезпечується гарячим теплоносієм, що рухається у поверхні (конвективний спосіб), гарячою поверхнею підкладки, на якій розташований матеріал (кондуктивний спосіб). До внутрішнього підведення енергії відносяться технології з використанням електромагнітної енергії довгохвильового діапазону електромагнітного спектру. Для ІЧ випромінювання характерна довжина хвилі від 0,1 до 10 мкм, для мікрохвильового випромінювання від 10 см до 50 см, для УВЧ - більше 1 м. Велика довжина хвилі визначає і велику глибину проникнення хвилі в діелектричний матеріал - звідси і поняття "внутрішній" нагрів. Слід зауважити, що із загальної фізичної точки зору будь-який процес нагріву можна розглядати як об'ємний, але з різною глибиною проникнення. Питання використання цих різновидів електромагнітної енергії обумовлено глибиною проникнення хвиль всередину тіла, тобто пов'язане з конкретними особливостями продукту, який оброблюється. В даному випадку - це характерний розмір тіла (товщина нарізки). Так, для розмірів в десятки сантиметрів краще використовувати УВЧ, для сантиметрової нарізки (1-10 см) - мікрохвильову енергію і для товщини 2-5 мм - ІЧ [10]. Оскільки теплоізоляційні вироби мають переважно товщину до 10 см, то використання НВЧ випромінювання для їх виготовлення є можливим.

*Метою роботи* є порівняння процесів спучення рідинноскляних композицій при виготовленні формових теплоізоляційних виробів в різних умовах - при мікрохвильовому нагріві і традиційному конвективному нагріві та визначення найбільш ефективного виду нагріву.

**Аналіз стану питання.** Спучення рідинних стекел значно залежить від режиму термообробки. Дослідженнями І.В. Рижкова і В.С. Толстого [11] встановлено, що спучення рідинного скла, незалежно від силікатного модуля, практично повністю завершується при нагріванні до 200-250 °С, тобто до температури, яка відповідає максимальному видаленню вільної і адсорбційної води [12]. Подальше підвищення температури до 400-500 °С призводить до закріплення структури рідинноскляного матеріалу в

результаті кристалізації продуктів спучення. З результатів дослідження фазових змін в системі  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ , встановленим В.І. Корнєєвим і В.В. Даніловим, витікає, що в інтервалі температур 200-400 °С крім метасилікатів натрію спостерігається і утворення більш збагачених кремнеземом кристалічних структур. При цьому виникають умови для розвитку полімеризаційних процесів, і в системах рідинноскляних матеріалів з високим силікатним модулем формуються кристали із складним аніонним складом аж до кварцу [13].

Внаслідок видалення кристалізаційної (хімічно зв'язаної) води спучення рідинних стекл спостерігається і при більш високих температурах (600-800 °С), коли вода вже практично не утримується твердою фазою. При нагріванні гідросилікатів натрію понад 600 °С спочатку втрачається кристалогідратами і гідратами хімічно зв'язана вода, а потім відбувається додаткова аніонна поліконденсація і видаляється вода з гідроксильних груп [14]. Однак величина і інтенсивність спучення внаслідок видалення кристалізаційної води незначні. Пояснюється це невеликою кількістю хімічно зв'язаної води у складі гідросилікатів натрію в порівнянні з вмістом вільної і адсорбційної води, що видаляються за невисокої температури. З підвищенням температури термообробки більше 800 °С спостерігається розкристалізація структури спученого рідинного скла і утворення розплаву з гольчатими і призматичними включеннями силікатів натрію ( $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$  і  $\alpha\text{-Na}_2\text{Si}_3\text{O}_5$ ). При 900-1000 °С спучення відсутнє, а кристалічна фаза повністю зникає. В результаті отвердження склоподібного розплаву утворюється монолітна слабопориста маса [15].

**Постановка завдання.** Оскільки з наведених даних можна зробити висновок, що підвищення температури теплової обробки понад 500 °С незначно впливає на величину і інтенсивність спучення рідинноскляних матеріалів і призводить лише до підвищення енерговитрат, тому було цікавим проведення процесу спучення за більш низьких температур нагріву.

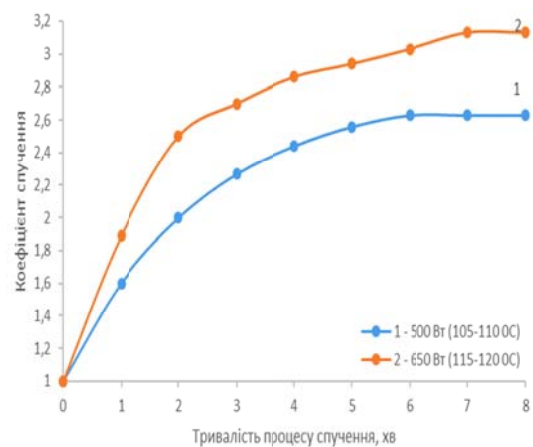
Спучення рідинноскляних матеріалів під дією НВЧ випромінювання проводилось при двох потужностях - 500 і 650 Вт, тому що в цих випадках вдається досягти низьких значень температур процесу - нижче 200 °С (500 Вт відповідає температурі 100-105°С, 650 Вт - 115-120°С).

При конвективному нагріві дослідження проводились при двох температурах: 200 і 300 °С. Оскільки при традиційному конвективному нагріві тепло витрачається не тільки на нагрів РСК, а й на нагрів форми і стінок установки, то для здійснення процесу були обрані температури: 300 °С – при даній температурі коефіцієнт спучення близький до коефіцієнту спучення РСК в умовах НВЧ випромінювання і 200 °С - найнижча температура, при якій взагалі можливо спучення матеріалу. Отримання зразків при конвективному нагріві за температур 100-120 °С, як у випадку застосування НВЧ

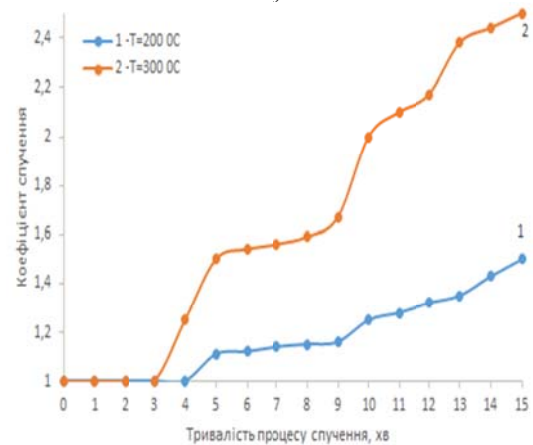
випромінювання, є неможливим, так як спучення не відбувається, а відбувається лише сушка матеріалу.

Рідинноскляна композиція, що використовується для виготовлення формових 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 зернистий заповнювач використовуються неспучені гранули на основі РС і оксиду цинку.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** В ході дослідження було визначено коефіцієнт спучення в різний час нагріву РСК, дана залежність наведена на рис.1.



а)



б)

Рис. 1. Залежність коефіцієнту спучення від тривалості процесу:

а – НВЧ нагрів, б – конвективний нагрів

З даних рисунка 1(а) видно, що найбільша інтенсивність спучення спостерігається під дією НВЧ випромінювання в першу хвилину процесу, і при потужності випромінювання 500 Вт коефіцієнт спучення (К) сягає значення 1,63, а при 650 Вт – 1,89. Тобто зі збільшенням потужності НВЧ випромінювання підвищується інтенсивність

спучення РСК і максимального значення  $K$ , яке дорівнює 3,13, вона досягає вже через 7 хв нагріву при потужності випромінювання 650 Вт, а при потужності 500 Вт максимальне значення  $K$  становить лише 2,63.

З рис. 1(б) видно, що перші 3-4 хв нагріву відповідають індукційному періоду, коли спучення не спостерігається, а відбувається розігрів матеріалу. Далі швидкість процесу спучення дещо збільшується і на 5 хв  $K$  сягає значень 1,11 і 1,5 при 200 і 300 °С відповідно. Низьке значення коефіцієнта спучення при 200 °С говорить про високий ступінь сушіння РСК, що призводить до випаровування конституційної води і зниження поризаційної здатності РСК. При 300 °С спочатку була видалена вільна вода, і спостерігалось різке зростання інтенсивності процесу спучення, та через 15 хв процесу  $K$  досяг значення 2,5, тоді як при 200 °С всього 1,5. Тривалий процес прогріву РСК в цьому випадку призводить до втрати зв'язаної води, пароутворення якої ініціює процес спучення.

Отримані дані підтверджуються і наведеними вище літературними даними із спучення рідинних стекел, з яких можна зробити висновок, що оптимальна температура спучення рідинних стекел і рідинноскляних композицій знаходиться в межах 400-500 °С, а при температурах 200-300 °С спучення є малоефективним.

Характер кривих спучення РСК в умовах НВЧ випромінювання і конвективного нагріву значно відрізняються. Так при конвективному нагріві має місце наявність індукційного періоду, але потім швидкість різко зростає і далі процес поступово затухає. У разі НВЧ випромінювання індукційний період відсутній, і процес з самого початку йде з великою швидкістю, а потім у міру зменшення концентрації газоутворюючих речовин сповільнюється. На відміну від процесу спучення під дією НВЧ випромінювання, при конвективному нагріві процес проходить рівномірно з поступовим виділенням води внаслідок чого відбувається переважно сушка матеріалу, а не його спучення.

Значне прискорення процесу спучення при МХ опроміненні зразків відбувається не тільки через зростання температури, але і за рахунок посилення конвекційних потоків у РС. Збільшення швидкості процесу у мікрохвильовому полі пов'язано з ефектом Максвелла-Вангера, який полягає у тому, що у гетерогенних системах, які складаються з фаз з різними діелектричними властивостями, при прикладенні електромагнітного поля можливо виникнення зарядів на межі розділу фаз, тобто виникнення поверхневої поляризації (при накладанні зовнішнього електромагнітного поля в речовині відбувається поляризація зарядів), яка сприяє швидкої трансформації речовиною МХ поля у теплову енергію, таким чином відбувається виділення теплоти внаслідок діелектричних втрат при поляризації.

Таким чином можна стверджувати, що під дією НВЧ випромінювання можна виготовляти ефективні теплоізоляційні матеріали на основі рідинного скла при більш низьких температурах та впродовж значно

меншого часу термообробки, в порівнянні з традиційним конвективним нагрівом, оскільки при мікрохвильовому впливі шар зразка прогрівається майже миттєво, а розм'якшення усієї маси РСК досягає за декілька секунд [16].

Для підтвердження ефективності проведення процесу спучення рідинноскляних матеріалів в НВЧ установці було визначено енергоспоживання і ККД сушильної і НВЧ установок. ККД процесу спучення визначався відповідно до розрахунку показників ефективності сушильних та НВЧ установок.

1) Сушильна установка [17].

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

ККД сушильної шафи розраховується за формулою:

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

Для будь-якої сушильної 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:

$$q_{\text{кор}} = r(x_2 - x_1), \quad (2)$$

де  $r$  - питома теплота пароутворення води;

$x_2$  - маса матеріалу до спучення;

$x_1$  - маса матеріалу після спучення.

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

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

де  $c_p$  - теплоємність суміші.

2) НВЧ-установка [18].

Загальну витрату енергії на проведення процесу спучення розраховують за формулою:

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

де  $Q_{\text{input}}$  - енергія, що вводиться в систему, Дж;

$P$  - потужність установки;

$\tau$  - тривалість процесу.

Ефективність використання енергії розраховують за формулою:

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

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

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

де  $Q_{\text{vap}}$  - теплота випаровування води;

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

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

де  $m$  - маса реакційної суміші;

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

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

Результати розрахунку:

1) сушильна установка

Номинальна потужність сушильної шафи становить 1100 Вт.

Корисно використана теплота становить:

$$q_{\text{кор}} = r(x_2 - x_1) = 1520(1 - 0,684) = 480,32 \text{ кДж},$$

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

$x_1$  – маса матеріалу після спучення. Так як протягом спучення в сушильній шафі матеріал втрачає 31,6% маси, то цей показник має значення 0,684 кг.

$r$  – питома теплота пароутворення. Для води при температурі 300 °С значення  $r$  за довідковими даними складає 1520 кДж/кг.

Витрачена теплота становить:

$$q_{\text{витр}} = c_p(t_1 - t_0) = 3,74(300 - 20) = 1047,2 \text{ Дж}.$$

де  $c_p$  – теплоємність рідинноскляної композиції, розраховуємо як суму теплоємностей компонентів з урахуванням їх питомого вмісту (теплоємність рідинного скла за довідковими даними становить 4,186 кДж/кг·°С).

$$c_p = 3,75 \text{ кДж/кг·°С}.$$

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

$t_1$  – температура всередині сушильної шафи, 300 °С.

$$\text{Тоді, } \eta = \frac{q_{\text{кор}}}{q_{\text{витр}}} = \frac{480,32}{1047,2} = 0,46$$

2) НВЧ-установка.

Потужність НВЧ-випромінювання 650 Вт.

Енергія, що вводиться в систему:

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

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

$$Q_{\text{heat}} = m \cdot c \cdot \Delta T = 1 \cdot 3,75 \cdot 97 = 361,81 \text{ кДж}.$$

$m$  – маса суміші – 1 кг.

$c$  – теплоємність рідинноскляної композиції, знайдена вище і складає  $c_p = 3,75$  кДж/кг·°С.

$$\Delta T = 117 - 20 = 97 \text{ °С}$$

Теплота, яку необхідно витратити системі для здійснення процесу:

$$Q_{\text{abs}} = Q_{\text{heat}} + Q_{\text{var}} = 361,81 + 2207 = 2568,81 \text{ кДж}.$$

$Q_{\text{var}}$  – теплота випаровування води. При потужності установки 650 Вт середня температура матеріалу складала 117°С. Теплота випаровування води при даній температурі становить 2207 кДж/кг.

$$\text{Звідси } \eta = \frac{Q_{\text{abs}}}{Q_{\text{input}}} = \frac{2568,81}{3250} = 0,79$$

За результатами розрахунків ККД сушильної шафи становить 0,46; ККД НВЧ-установки становить 0,79. Остільки ККД НВЧ-установки майже вдвічі перевищує ККД сушильної шафи спучення композиційного матеріалу, то доцільніше процес проводити під дією НВЧ випромінювання.

На даний час існують НВЧ-установки різних моделей. Наряду з класичними камерними НВЧ-печами у промисловості застосовуються безперервно працюючі сушильні та нагрівальні установки. Для сушки або нагріву виробів великого розміру застосовують переважно камерні НВЧ-установки періодичної дії (рис. 2). НВЧ енергія виробляється в них 38 магнетронами, які розташовані по обидва боки камери, щоб гарантувати рівномірних нагрів, також з обох боків знаходяться системи вентиляції. Такі камери застосовують для сушки кераміки, нагріву

каучуків і т.ін. [19]. Даний тип установок пропонується використовувати для виготовлення теплоізоляційних виробів різної конфігурації. Структура такої печі наведена на рис. 3. Форма для виготовлення виробів повинна бути розбірною та виготовлена з радіо-прозорого матеріалу (який не поглинає НВЧ випромінювання), наприклад з фторпласту. Для видалення пари у верхній кришці форми повинні бути отвори [20].



Рис. 2. Камерна НВЧ-установка

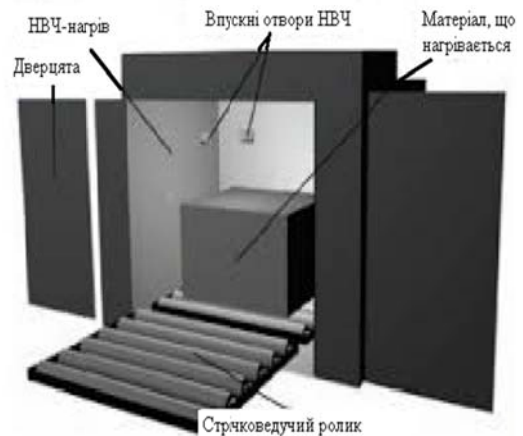


Рис. 3. Структура камерної НВЧ печі

**Висновки.** Порівняльний аналіз процесів спучення РСК при конвективному і НВЧ нагріві показав більш високу ефективність спучення за допомогою МХ випромінювання. Необхідна тривалість такої термообробки складає 8-10 хв. Найбільш близькими до таких матеріалів за коефіцієнтом спучення є матеріали, отримані при конвективному нагріві при температурі 300 °С, тривалість такого нагріву триває понад 15 хв. При отриманні спучених матеріалів за допомогою традиційного конвективного нагріву відбувається поступове випаровування води, внаслідок якого відбувається переважно сушіння матеріалу без спучення. До того ж розрахований ККД НВЧ установки майже в два рази перевищує ККД сушильної установки, так для НВЧ-установки він складає 0,79, а сушильної установки - всього 0,46..

### Список літератури:

1. Лотов В.А. Перспективные теплоизоляционные материалы с жесткой структурой. *Строительные материалы*, 2004. № 11. С. 8-10.
2. Сыр'евая смесь для получения пеносиликатного теплоизоляционного материала: пат. 2097362 Россия: МКИ С04В 38/00. № 95108038/03; заявл. 17.05.1995; опубл. 27.11.1997.
3. Сыр'евая смесь и способ получения теплоизоляционного материала: пат. 2128633 Россия: МКИ С04В 28/26. № 96115722/03; заявл. 29.07.1996; опубл. 10.04.1999.
4. Вспененный материал и способ его изготовления: пат. 2268248 Россия: МКИ С04В 28/26. № 2004120692/03; заявл. 06.07.2004; опубл. 20.01.2006. Бюл. № 2. 6с.
5. Способ получения теплоизоляционного материала на основе жидкого стекла: пат. 2177922 Россия: МКИ С04В 28/26. № 2000122266/03; заявл. 24.08.2000; опубл. 10.01.2002.
6. Композиция для получения теплоизоляционного материала: пат. 2165908 Россия: МКИ С04В 28/26. № 2000117944/03; заявл. 10.07.2000; опубл. 27.04.2001.
7. Способ получения блоков пеносиликата: пат. 2225373 (13) С1 Россия: МПК С03С11/00. № 2002123820/03; заявл. 06.09.2002; опубл. 03.10.2004.
8. Соколов И.В. Магнетроны для СВЧ нагрева и источники СВЧ энергии. *Электронная промышленность*. 1996. №3. С.4-9.
9. Плазменные процессы в производстве электронной техники/А.П. Достанко, С.В. Бордусов, И.В. Свядковский и др./Под общ. ред. А.П. Достанко. Мн.: ФУА информ, 2001. 244с
10. SENERGYS. Микроволновые Технологии и оборудование. URL: <http://senergys.ru/proektyi/tehnologii.html>.
11. Рыжков И.В., Толстой В.С. Физико-химические основы формирования свойств смесей с жидким стеклом. Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1975. 136 с.
12. Торубриев Б.Д. Строительные материалы на основе силикат-натриевых композиций. М.: Стройиздат, 1988. 208 с.
13. Кудряков А.И., Свергунова Н.А. Исследование процесса получения зернистого теплоизоляционного материала на основе высокомолекулярной жидкостеклоной композиции из микоркремнезема. *Вестник ТГАСУ*. 2008. № 1. С. 130-137.
14. Лазарев А.Н. Структурные превращения в стеклах при повышенных температурах. М.: Наука, 1965. 233 с.
15. Корнеев В.И., Данилов В.В. Растворимое и жидкое стекло. Л.: Стройиздат, Ленингр. Отд-ние, 1991. 176 с.
16. Рymar Т.Е. Дослідження впливу НВЧ випромінювання на властивості композиційних теплоізоляційних матеріалів на основі рідного скла. *Науковий вісник будівництва*. Харків. 2021. Т. 104. № 2. С. 284-291.
17. Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н., Громова Е.Н. Теплообменное оборудование предприятий (Сушильные установки): учебное пособие, ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2016. 142 с.
18. Пинчукова, Н. А. Основы технологии получения кокарбоксилызы гидрохлорида с использованием микроволнового излучения: дис. канд. техн. наук: 05.17.04. Харьков, 2014. 151 с.
19. Imenokhovev I., Windsheimer H., Weitz R., Kintsel N., Lynn H. Microwave heating technology: potential and limits. URL [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).
20. Технологические системы и комплексы. URL: <http://tsc-technologies.ru/ru/>.

### References (transliterated)

1. Lotov V.A. Perspektivnye teploizoljacionnye materialy s zhestkoj strukturoj. *Stroitel'nye materialy*, 2004. № 11. S. 8-10.
2. Syr'evaja smes' dlja poluchenija penosilikatnogo teploizoljacionnogo materiala: pat. 2097362 Rossija: MKI S04V 38/00. № 95108038/03; zajavl. 17.05.1995; opubl. 27.11.1997.
3. Syr'evaja smes' i sposob poluchenija teploizoljacionnogo materiala: pat. 2128633 Rossija: MKI S04V 28/26. № 96115722/03; zajavl. 29.07.1996; opubl. 10.04.1999.
4. Vspennyj material i sposob ego izgotovlenija: pat. 2268248 Rossija: MKI S04V 28/26. № 2004120692/03; zajavl. 06.07.2004; opubl. 20.01.2006. Bjul. № 2. 6s.
5. Sposob poluchenija teploizoljacionnogo materiala na osnove zhidkogo stekla: pat. 2177922 Rossija: MKI S04V 28/26. № 2000122266/03; zajavl. 24.08.2000; opubl. 10.01.2002.
6. Kompozicija dlja poluchenija teploizoljacionnogo materiala: pat. 2165908 Rossija: MKI S04V 28/26. № 2000117944/03; zajavl. 10.07.2000; opubl. 27.04.2001.
7. Sposob poluchenija blokov penosilikata: pat. 2225373 (13) C1 Rossija: MPK C03C11/00. № 2002123820/03; zajavl. 06.09.2002; opubl. 03.10.2004.
8. Sokolov I.V. Magnetrony dlja SVCh nagreva i istochniki SVCh jenerгии. *Jelektronnaja promyshlennost'*. 1996. №3. S.4-9.
9. Plazmennye processy v proizvodstve jelektronnoj tehniki/A.P. Dostanko, S.V. Bordusov, I.V. Svadkovskij i dr. /Pod obshh. red. A.P. Dostanko. Mn.: FUA inform, 2001. 244s
10. SENERGYS. Mikrovolnovye Tehnologii i oborudovanie. URL: <http://senergys.ru/proektyi/tehnologii.html>.
11. Ryzhkov I.V., Tolstoj V.S. Fiziko-himicheskie osnovy formirovanija svojstv smesej s zhidkim steklom. Har'kov: Izd-vo Har'kovskogo un-ta, 1975. 136 s.
12. Torubriev B.D. Stroitel'nye materialy na osnove silikat-natrievyh kompozicij. M.: Strojizdat, 1988. 208 s.
13. Kudjakov A.I., Svergunova N.A. Issledovanie processa poluchenija zernistogo teploizoljacionnogo materiala na osnove vysokomodul'noj zhidkostekol'noj kompozicii iz mikorkremnezema. *Vestnik TGASU*. 2008. № 1. S. 130-137.
14. Lazarev A.N. Strukturnye prevrashhenija v steklah pri povyshennyh temperaturah. M.: Nauka, 1965. 233 s.
15. Korneev V.I., Danilov V.V. Rastvorimoe i zhidkoe steklo. L.: Strojizdat, Leningr. Otd-nie, 1991. 176 s.
16. Rymar T.E. Doslidzhennja vplivu NVCh viprominjuvannja na vlastivosti kompozicijnih teploizoljacionnih materialiv na osnovi ridinnogo skla. *Naukovij visnik budivnictva*. Harkiv. 2021. T. 104. № 2. S. 284-291.
17. Lakomkin V.Ju., Smorodin S.N., Gromova E.N. Teploobmennoe oborudovanie predpriyatij (Sushil'nye ustanovki): uchebnoe posobie, VShTJe SPbGUPTD. SPb., 2016. 142 s.
18. Pinchukova, N. A. Osnovy tehnologii poluchenija kokarboksilazy gidrohlorida s ispol'zovaniem mikrovolnovogo izluchennja: dis. kand. tehn. nauk: 05.17.04. Har'kov, 2014. 151 s.
19. Imenokhovev I., Windsheimer H., Weitz R., Kintsel N., Lynn H. Microwaveheating technology: potential and limits. URL [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)
20. Tehnologicheskie sistemy i komplekсы. URL: <http://tsc-technologies.ru/ru/>.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

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