

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ЕКОЛОГІЯ

Д. П. Кіндзера, В. М. Атаманюк, Р. Р. Госовський
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра хімічної інженерії
Kindzera74@ukr.net

СУШІННЯ МІКРОСФЕРИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА
СУХИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ

<https://doi.org/10.23939/ctas2022.01.133>

Перспективним напрямом виробництва сухих теплоізоляційних будівельних сумішей є використання мікросфери теплових електростанцій, що сприятиме формуванню теплоізоляційних, міцнісних, хімічно- та термічностійкісних властивостей продукції. Для сушіння мікросфери запропоновано фільтраційний метод, який полягає у профільтруванні теплового агенту крізь пористу структуру матеріалу в напрямку “матеріал – перфорована перегородка”. Результати досліджень впливу температури та швидкості теплового агенту на тривалість сушіння мікросфери та отримані значення коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту до частинок мікросфери $\alpha = 35 \div 72 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ дають змогу розрахувати енергозатрати на реалізацію процесу сушіння та вибрати оптимальні параметри для його інтенсифікації.

Ключові слова: мікросфера; теплові електростанції; сухі теплоізоляційні будівельні суміші; фільтраційне сушіння; тепловий агент; коефіцієнт тепловіддачі.

Вступ

Застосування теплозберігальних конструкцій у будівельній промисловості пов’язане з використанням сучасних теплоізоляційних матеріалів, які дають змогу покращити не лише тепло-, а й звукоізоляційні характеристики будівель і споруд. Сьогодні замовники добре інформовані про переваги використання теплоізоляції, а матеріали з теплоізоляційними властивостями належать до найефективніших інструментів енергозбереження. Моніторинг ринку теплоізоляційних матеріалів в Україні показує, що вплив на його формування та розвиток спричиняє зростання цін на енергоресурси та стійку динаміку збільшення обсягів будівельних робіт. Номенклатура теплоізоляційної продукції, представлена на українському ринку, складається із таких груп: мінеральна вата і вироби з неї; матеріали зі скловолокна; пінопласти та пінополістироли; ніздрюваті бетони; полімерна крихта; дрібнодисперсні заповнювачі; сухі будівельні суміші тощо. За оцінками експертів, частка вітчизняних теплоізоляційних

матеріалів, які використовують для внутрішнього та зовнішнього утеплення будівель, на українському ринку не перевищує 30 % [1]. Тому часто спостерігається ситуація – високий попит на теплоізоляційні матеріали у пік будівельного сезону супроводжується стійким дефіцитом певних видів теплоізоляційної продукції, у перелік якої входять сухі теплоізоляційні будівельні суміші.

Виробництво сухих будівельних сумішей для теплоізоляції чи з покращеними теплоізоляційними характеристиками почало розвиватися в Україні протягом останніх десяти років і номенклатура продукції обмежується, здебільшого, оздоблювальними і вирівнювальними складами із зниженою густиною [2]. Однак перспективним напрямом використання сухих будівельних сумішей є зовнішня теплоізоляція приміщень, утеплення та звукоізоляція підлог, стін, міжповерхових перекриттів, а також виготовлення на їх основі теплоізоляційних виробів. Наявність ширшого асортименту продукції у вигляді сухих теплоізоляційних будівельних сумішей на українсь-

кому ринку забезпечують іноземні виробники [3, 4], задовольняючи лише незначну частку споживчого попиту.

Сухі будівельні суміші – багатокомпонентні системи, основними складовими яких є в'язучі речовини (цемент, гіпс, вапно, полімери) доповнені комплексом хімічних добавок для надання необхідних реологічних властивостей суміші, регулювання швидкості схоплення і тверднення зв'язника та забезпечення необхідних фізико-механічних властивостей розчину після твердіння. Для виготовлення сухих теплоізоляційних будівельних сумішей до основного компонентного складу додають легкі наповнювачі фіксованої дисперсності, отримані, переважно, з матеріалів природного походження: перліту, керамзиту, вермикуліту, пемзи тощо [5]. Сьогодні ставить нові вимоги до створення сухих теплоізоляційних будівельних сумішей, використання яких давало б змогу витримувати значні механічні навантаження, високі температури, дію хімічно активних середовищ. У сучасних умовах нестачі природних ресурсів актуальним напрямом розвитку промислового випуску сухих теплоізоляційних будівельних сумішей є розроблення ефективних складів сумішей із застосуванням як наповнювачів твердих побічних продуктів промисловості чи теплоенергетики, що дасть змогу зменшити потреби у природній сировині, знизити витрати на виробництво, розширити асортимент продукції з новими властивостями. Зважаючи на вищесказане, перспективним напрямом виробництва сухих будівельних теплоізоляційних сумішей є використання мікросфери теплових електростанцій, вилученої із золи винесення чи золошлакової суміші ТЕС, як компонента-наповнювача, що сприятиме формуванню теплоізоляційних, міцнісних, хімічно- та термічностійкісних властивостей готової продукції [6, 7].

Мікросфера теплових електростанцій (ценосфера) – малоосвоєний українським ринком і промисловістю матеріал. Необхідно зазначити, що в Україні вже існують деякі рішення щодо раціональної утилізації мікросфери, що утворюється внаслідок діяльності теплових електростанцій. Мікросферу застосовують як наповнювач у хімічній та будівельній промисловості під час виробництва бетонів, будівельних блоків, різних

видів пластмас, гумотехнічних виробів, що дало змогу розширити асортимент останніх та поліпшити їхні експлуатаційні властивості [8, 9]. Однак рівень використання мікросфери в Україні доволі низький, що пов'язано із недостатнім рівнем аудиту побічних продуктів, відсутністю відомостей про властивості матеріалу та про методи ефективної утилізації, збуту продукції та логістики. Проблема раціональної утилізації мікросфери ТЕС також великою мірою пов'язана із проблемою її сушіння після вилучення із золи винесення чи золошлакової суміші. Зола винесення вловлюють електрофільтрами, після чого в сухому пилоподібному стані вона являє собою тонкодисперсний матеріал. Зважаючи на низьку густину алюмосилікатних мікросфер, для їх виділення із золи винесення часто застосовують флотаційний метод. На більшості діючих ТЕС України для вилучення золошлаку з пиловугільних котлів застосовують систему гідровідведення. Після того, як гідросуміш потрапляє у ставки-накопичувачі, мікросфера піднімається на поверхню води і її збирають за допомогою насосів. Отже, залучення мікросфери у виробничий процес пов'язано із вирішенням загальної комплексної проблеми її перероблення після вилучення із зольних чи золошлакових відходів вказаними методами, що складається із кількох етапів: первинне оброблення, реалізація процесу сушіння, класифікація за фракціями, пакування та відвантаження готового продукту споживачеві. Типова технологічна схема для зневоднення мікросфери містить [10]: стрічковий вакуум-фільтр; проміжний накопичувальний бункер із живильником; теплогенератор – для приготування сушильного агента, що працює на різних видах палива (природний газ, скраплений газ, дизельне паливо, мазут, тверде паливо); барабанну сушарку; систему пилоочищення. Сушіння є найенергозатратнішою ланкою процесу перероблення мікросфери на готовий продукт. Внаслідок низької ефективності використання теплової енергії в барабанних сушарках енергетичні затрати на процес сушіння у декілька разів більші, ніж потрібно на перетворення вологи на пару.

З огляду на те, що мікросфера є дрібнодисперсним матеріалом, для сушіння останньої запропоновано фільтраційний метод, який полягає у профільтруванні теплового агента крізь по-

ристу структуру матеріалу, розміщеного на перфорованій перегородці, в напрямку “матеріал – перфорована перегородка” [11, 12]. Розвинена поверхня тепло- і масообміну та високі швидкості руху теплового агенту у порах і каналах стаціонарного шару матеріалу забезпечують високі коефіцієнти тепло- і масовіддачі й, відповідно, високу інтенсивність фільтраційного сушіння. Застосування фільтраційного методу сушіння дає змогу вилучити із технологічної лінії зневоднення мікросфери процес фільтрування, оскільки велику кількість вологи зі стаціонарного шару матеріалу буде механічно витіснити та виносити рухомий тепловий агент внаслідок перепаду тисків. Кінетичні особливості процесу сушіння мікросфери маловивчені, й у випадку застосування фільтраційного методу потребують встановлення впливу режимних параметрів теплового агенту на процес, щоб з’ясувати оптимальні та ефективні діапазони для інтенсифікації процесу.

Мета роботи – дослідження основних закономірностей кінетики фільтраційного сушіння мікросфери ТЕС за різних температур та швидкостей руху теплового агенту для зниження енергозатрат та інтенсифікації процесу зневоднення, а також дослідження основних характеристик висушеної мікросфери для її застосування як наповнювального компонента сухих теплоізоляційних будівельних сумішей.

Матеріали та методи досліджень

Як об’єкт дослідження використано мікросферу техногенного походження МС-(20-500) (мікросфера ТЕС), наведену на рис. 1. Це дрібнодисперсний порошок сірого кольору, гранулометричного складу від 20 до 500 мкм.



Рис. 1. Мікросфера МС-(20-500) техногенного походження

Методом мікроскопічного аналізу встановлено, що більшість частинок мікросфери є порожнистими (рис. 2), внутрішній об’єм заповнений газовими сумішами, основа яких – азот та оксид карбону (IV) [6, 7]; частинки мають пористу чи гладку поверхню (незначна кількість). Товщина оболонок мікросфери становить від 2 до 8 мкм (у середньому $5,5 \pm 0,1$ мкм).

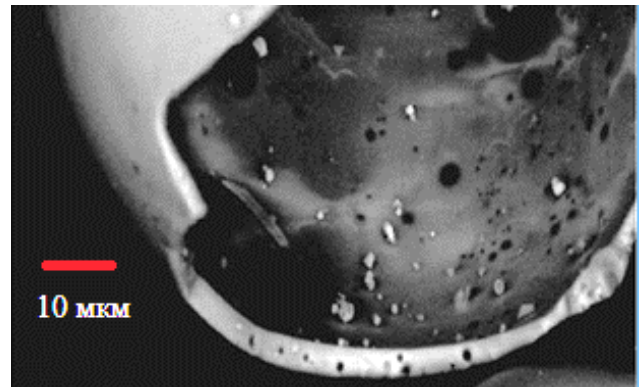


Рис. 2. Порожнистість мікросфери

Початковий середній вологовміст мікросфери, визначений як середньоарифметичне значення із п’яти дослідних наважок, становить 0,61 кг H_2O /кг сух. мат. Доволі високе значення вологовмісту мікросфери зумовлене наявністю вологи в порах оболонок значної кількості порожнистих частинок, поверхневої вологи та вологи міжзернового простору стаціонарного шару, яка утримується силами поверхневого натягу в каналах між окремими частинками. Оскільки початковий вологовміст мікросфери перевищує значення, необхідне для застосування матеріалу як компонента сухої будівельної суміші, то потреба її сушіння очевидна. Кінетику процесу сушіння мікросфери досліджували на експериментальній установці фільтраційного сушіння, за методиками, наведеними у роботі [12]. Висоту шару матеріалу для досліджень вибрано із урахуванням рекомендацій, згідно із якими $H = 20d_{част.}$, а також зважаючи на допустиме значення гідравлічного опору дрібнодисперсного матеріалу.

Результати досліджень та їх обговорення

Результати досліджень впливу температури та швидкості руху теплового агенту на зміну вологовмісту шару мікросфери в часі у ході

реалізації процесу фільтраційного сушіння на дослідній установці подано у вигляді графічних залежностей на рис. 3 та 4, відповідно. Вологовміст мікросфери в результаті сушіння змінюється від 0,61 до 0,027 кг H₂O/кг сух. мат.

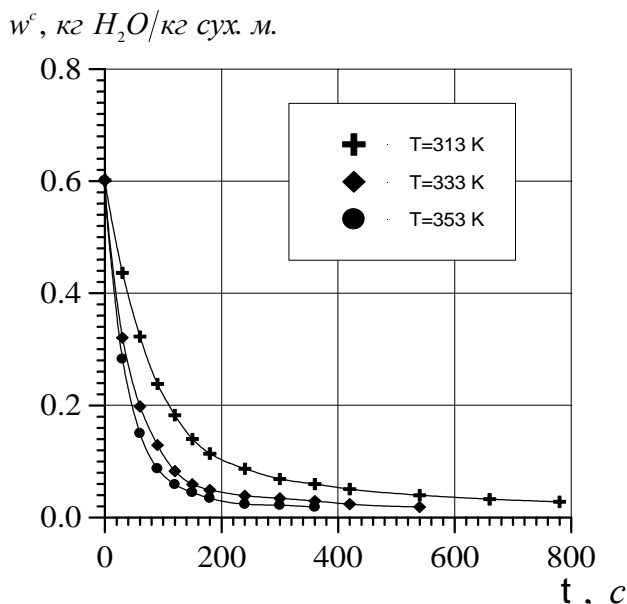


Рис. 3. Зміна вологовмісту стаціонарного шару мікросфери в часі за різних температур теплового агента ($H=12 \cdot 10^{-3}$ м; $u_0 = 2,12$ м/с)

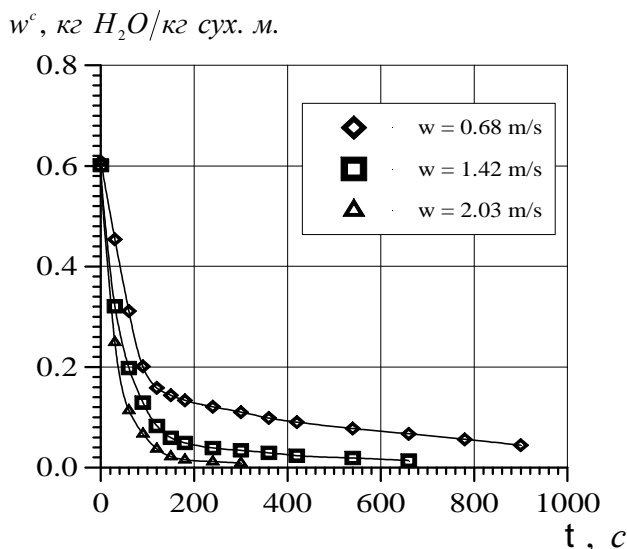


Рис. 4. Зміна вологовмісту стаціонарного шару мікросфери в часі за різних швидкостей руху теплового агента ($H = 12 \cdot 10^{-3}$ м; $T = 353$ К)

Оцінку впливу параметрів теплового агента на тривалість процесу наведено в табл. 1.

Залежність тривалості сушіння мікросфери від зміни параметрів теплового агента

Зміна температури теплового агента			
Температура теплового агента T , К	313	333	353
Тривалість процесу, t , с	780	543	360
Зміна швидкості руху теплового агента			
Фіктивна швидкість руху теплового агента, u_0 , м/с	0,68	1,42	2,03
Тривалість процесу, t , с	920	675	300

Для визначення коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агента за різних швидкостей його руху до частинок мікросфери експериментальні дослідження здійснювали у тонкому шарі $H = 0,010$ м. Результати експериментальних досліджень процесу теплообміну подано у вигляді графічних залежностей зміни температури теплового агента на виході із шару мікросфери (рис. 5).

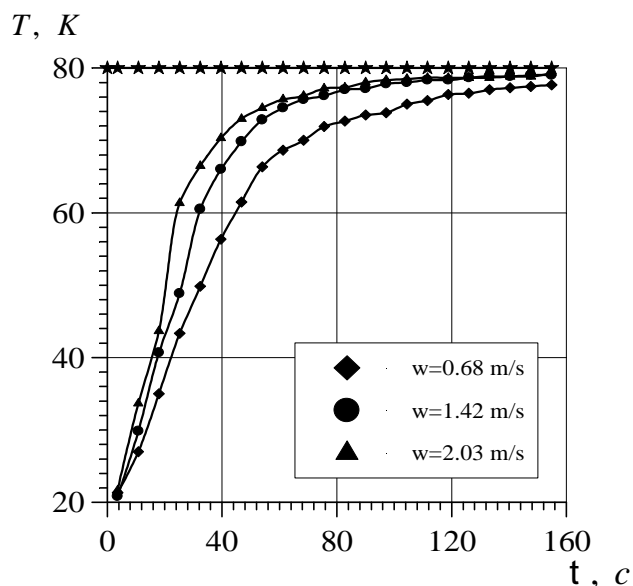


Рис. 5. Зміна температури теплового агента на виході із шару мікросфери ($H = 0,010$ м)

На підставі маси матеріалу m , кг; теплоємності c_s , Дж/кгК; середньої температури поверхні частин шару, \bar{T} , К, та початкової температури частин T_0 , К, розраховували кількість теплоти, витраченої на нагрівання шару мікросфери ΔQ , Дж:

$$\Delta Q = m \times c_s \times (\bar{T} - T_0) \quad (1)$$

Після цього, беручи до уваги поверхню теплообміну F , м²; середньоарифметичне значення температури теплового агента \bar{t} , К; середнє значення температури на поверхні частин мікросфери, \bar{T}_n , К, та тривалість процесу Δt , с, розраховували значення коефіцієнтів тепловіддачі α від теплового агента до частин мікросфери [12]:

$$\alpha = \frac{DQ}{F \times (\bar{t} - \bar{T}_n) \times \Delta t} \quad (2)$$

Отримані значення коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha = 35 \div 72$ Вт/м²·К дають змогу розрахувати енергозатрати на реалізацію процесу фільтраційного сушіння.

З метою застосування мікросфери як компонента сухої теплоізоляційної будівельної суміші здійснено подальші теоретичні та експериментальні дослідження. Встановлено, що мікросфера характеризується багатокомпонентним складом [13], основу якого становлять SiO₂ та Al₂O₃ і є хімічно інертним матеріалом, здатним значною мірою відбивати інфрачервоне випромінювання.

Таблиця 2

Хімічний склад алюмосилікатних мікросфер [13]

Елемент	Вміст елементу, %	Оксид	Вміст оксиду, %
Na	0,45	Na ₂ O	0,68
Mg	0,40	MgO	0,78
Al	12,33	Al ₂ O ₃	30,10
Si	20,23	SiO ₂	58,21
K	1,87	K ₂ O	4,22
Ca	0,47	CaO	1,26
Ti	0,25	TiO ₂	0,96
Fe	0,99	Fe ₂ O ₃	3,79

Низьке значення коефіцієнта теплопровідності мікросфери $\lambda = 0,08 - 0,20$ Вт/(м·К) великою мірою зумовлене наявністю діоксиду вуглецю у порожнечі частинок (коефіцієнт теплопровідності λ діоксиду вуглецю удвічі менший, ніж повітря та азоту). Температуру плавлення мікросфери 1450 °С визначено нагріванням її у муфельній печі.

Насипну густину фракцій мікросфери $\gamma_{нас}$ визначали за методикою ДСТУ ISO 567-2002 і розраховували згідно із залежністю:

$$\gamma_{нас} = \frac{\sum G_i}{\sum V_i} \quad (3)$$

де G – маса проби матеріалу, кг; V – об'єм проби матеріалу, м³. Насипна густина мікросфери становить 350–420 кг/м³.

Питому поверхню шару мікросфери визначали із залежності:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N F_{fp}}{V_{заг}} \quad (4)$$

де F_{fp} – сумарна поверхня всіх частинок i -ї фракції, м²; $V_{заг}$ – загальний об'єм шару матеріалу, м³. Розрахункова питома поверхня шару мікросфери, обчислена із урахуванням густини, становить 1100–1200 см²/г.

Аналіз основних властивостей мікросфери показав, що матеріал характеризується низькою насипною густиною, що надає кінцевим матеріалам легкості. Мікросфера є хімічно інертним матеріалом, тому його можна використовувати в умовах дії агресивного середовища. Зважаючи на високе значення температури плавлення, матеріал є термостійким і має високі вогнетривкі властивості, тому здатний функціонувати в умовах високої температури й уповільнювати горіння кінцевого продукту. Зважаючи на низьку теплопровідність, матеріал є теплоізоляційним, окрім цього, має властивість відбивати інфрачервоний спектр випромінювання. Незначна пористість оболонок більшості частин мікросфери та суцільна структура поверхні меншої кількості частинок зумовлюють низькі водопоглинальні властивості матеріалу. Дрібнодисперсність та сферична форма частинок матеріалу забезпечують значну питому поверхню шару матеріалу та його плинність, що зумовлює легкість вкладання на поверхнях. Отже, унікальне поєднання властивостей вказує на можливість застосування мікросфери для виробництва сухих теплоізоляційних будівельних сумішей із високою тепло- і вогнестійкістю.

З використанням мікросфери техногенного походження МС-(20-500), попередньо висушеної фільтраційним методом, приготовано дослідну партію сухої теплоізоляційної будівельної суміші. Для цього за допомогою терезів відважували необхідні компоненти (портландцемент, мікросферу, хлорид та нітрат кальцію, карбоксиметилцелюлозу, пластифікатор) та змішували їх за допомогою апарата з мішалкою, після цього готовий продукт пакували. Дослідну партію сухої суміші використовували для створення експериментальних зразків тонкошарового покриття, після чого визначали фізико-механічні та експлуатаційні характеристики: зчеплення з основою 1,3 МПа; границю міцності на стиск 2,2 МПа; границю міцності на розтяг у разі вигину 2,05 МПа. Отже, суха будівельна суміш дає змогу отримати теплоізоляційне покриття, яке відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.6-189:2013 “Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель” і яке можна рекомендувати для нанесення як ззовні, так і всередині приміщення житлових будинків, для влаштування звукоізоляційних стяжок і прошарків підлог цивільних будівель.

Висновки

Раціональний метод утилізації мікросфери теплових електростанцій, вилученої із золи винесення чи золошлакової суміші, дасть змогу замінити природні сировинні ресурси на ресурси техногенного походження для отримання наповнювачів, необхідних для виробництва сухих теплоізоляційних будівельних сумішей.

Результати досліджень кінетики сушіння мікросфери та отримані внаслідок узагальнення результатів теплообміну значення коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту до частинок мікросфери дадуть змогу розрахувати енергозатрати та науково обґрунтовано вибрати оптимальні параметри теплового агенту для інтенсифікації процесу сушіння.

Застосування мікросфери теплових електростанцій, вилученої із золи винесення чи золошлакової суміші, як компонента-наповнювача сухих будівельних сумішей сприятиме

формуванню теплоізоляційних, міцнісних, хімічно- та термічностійкісних властивостей готової продукції та дасть змогу розширити її асортимент.

References

1. <https://naopte.com/ua/a428121-utepliteli-analiz-rynka.html>
2. Rudavskyy, A., Oleynyk, Y. (2001), Sukhye stroytel'nye smesy. Sostoyanye y nekotorye tendentsyy razvytyya ukraynskoho rynku. *Stroytel'nye materyaly*, No. 3, 17–20.
3. Smachylo, V., Blazhko, V., Khalina, V. (2016), Stratehichni aspekty tsinoutvorennya na rynku sukhykh budivel'nykh sumishey v ukrayini, *Stratehiya ekonomichnoho rozvytku Ukrayiny*, No. 38, 51–64.
4. Ocheretnyy, V., Bondar, A. (2011). Perspektyvy vyrobnytstva i vykorystannya poryzovanykh sukhykh budivel'nykh sumishey. *Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruksiyi v budivnytstvi*, No. 2, 36–39.
5. <https://yakukremont.ru/obladnannja-ta-instrument/1615-virobnictvo-suhih-budivelnih-sumishey.html>
6. Blanco, P., Garcia, P., Mateos, J. (2000). Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with cenospheres. *Cement and Concrete Research*, 30 (11), 1715–1722.
7. Ngu, L., Wu, H., Zhang, D. (2007). Characterization of ash cenospheres in fly ash from Australian power station. *Energy Fuels*, 21(6), 3437–3445. <https://doi.org/10.1021/ef700340k>.
8. Shkoda, V. (2019). Rynok zol'nykh mikrosfer Ukrayiny. *Tovarnoznavchyy visnyk Luts'koho NTU*, No. 9, 43–49.
9. Demchenko, V. (2016). Eksportno-importnyy potentsial zol'nykh mikrosfer v Ukrayini. *Tovary i rynky*. Kyiv, KNTEU, No. 2, 31–38.
10. <https://www.progress.ua/product/heat-mass-exchange-equipment/filtering-and-drying-systems-for-dewatering-of-aluminum-silicate-microspheres/>
11. Hosovskyi, R., Kindzera, D., Atamanyuk, V. (2016). Diffusive Mass Transfer during Drying of Grinded Sunflower Stalks. *Chemical Technology and Engineering*. Lviv, 105–108. DOI: <http://doi.org/10.23939/cte2019.01.105>
12. Atamaniuk, V., Humnytskyi, Ya. (2013). *Naukovi osnovy filtratsiinoho sushinnia dyspersnykh materialiv*. Lviv: Vyd-vo Lviv. politekhniki, 255.
13. Sklyar, L., (2016). Tekhnolohyya obohashchennyia zoloshlakov Zelenodol'skoy TÉS s poluchenym alyumosylykatnykh mykrosfer. *Zbahachennya korysnykh kopalyn*, Vyp. 63(104).

D. P. Kindzera, V. M. Atamaniuk, R. R. Hosovskyi

Lviv Polytechnic National University,
Department of Chemistry Engineering
Kindzera74@ukr.net

**DRYING OF THE MICROSPHERE FOR THE MANUFACTURE
OF HEAT-INSULATING DRY BUILDING MIXES**

A promising area for the production of heat-insulating dry building mixes is the use of the microsphere of thermal power plants, that will promote the formation of thermal insulation, strength, chemically and thermally stable properties of products. To dry the microsphere, a filtration method was proposed which consists in filtering the heat agent through the porous structure of the material in the direction “material – perforated grate”. The investigated results of the heat agent temperature and velocity effect on the drying process duration of microsphere and obtained values of heat transfer coefficients from heat agent to microsphere particles $\alpha = 35 \div 72 \text{ W/m}^2\text{K}$ allow to calculate energy consumption for the implementation of the drying process and to choose optimal technological parameters for it intensification.

Key words: microsphere; thermal power plants; heat-insulating dry building mixes; filtration drying; heat agent; heat transfer coefficient.