

Кіндзера Д.П.

Національний університет «Львівська Політехніка»

Сомар Г.В.

Національний лісотехнічний університет

ЗАСТОСУВАННЯ ДЕРЕВНОГО ПИЛУ ТА ЗОЛОШЛАКУ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЛЕГКИХ НАПОВНЮВАЧІВ

Огляд джерел літератури показав, що одним із раціональних методів утилізації деревного пилу та золошлакових відходів теплових електростанцій є їх залучення до виробничих процесів, що відповідає сучасним тенденціям розвитку технологій у промислово розвинених країнах. Такий підхід дає змогу зменшити кількість відвалів та запобігти подальшому накопиченню відходів. Основними перевагами використання вказаних відходів у виробничому процесі є захист навколишнього середовища та збереження сировинних ресурсів для виробництва готової продукції. Запропоновано технологію виробництва легких наповнювачів для бетону з використанням золошлакових відходів ТЕС та деревного пилу деревообробних підприємств як сировинних компонентів. Частину глинистого матеріалу, що є основним компонентом шихти за класичною технологією виробництва наповнювачів, можна замінити золошлаком, зважаючи на близький уміст основних хімічних компонентів. Уведення в склад шихти деревного пилу сприятиме формуванню пористості наповнювачів під час його вигорання за високих температур. Золошлакові відходи, які є гідралічними сумішами, необхідно висушувати, зважаючи на високий вологовміст. Оскільки енергозатрати на реалізацію процесу сушіння є значними, пошук альтернативних методів сушіння є актуальним завданням. Для реалізації процесу сушіння золошлаку запропоновано метод фільтраційного сушіння, який дає можливість інтенсифікувати процеси масо- і теплообміну, зменшити тривалість сушіння. Досліджено вплив швидкості теплового агента на тривалість процесу сушіння золошлаку. Кінетичні криві для золошлаку характеризуються періодами механічного витіснення та видалення вологи. Отже, сушіння золошлакових відходів фільтраційним методом дозволить знизити енерговитрати на реалізацію процесу за рахунок витіснення та видалення значної кількості вологи рухомих тепловим агентом під дією перепаду тиску. Результати дослідження кінетики сушіння є корисними для організації та інтенсифікації процесу як попереднього етапу на лінії виробництва легких наповнювачів. Зразки пористого наповнювача готували з використанням шихти різного складу. Досліджено фізико-механічні властивості зразків легких наповнювачів, як-от теплопровідність та міцність на стиск. Отримані наповнювачі рекомендовані для виробництва легких бетонів.

Ключові слова: золошлакові відходи, деревний пил, утилізація, легкі наповнювачі, фільтраційне сушіння, легкий бетон.

Постановка проблеми. Унаслідок діяльності підприємств різних галузей промисловості в Україні щорічно утворюється та накопичується значна кількість промислових відходів. На превеликий жаль, нині найпоширенішим способом поводження з промисловими відходами в Україні є розміщення їх у відвали, терикони, шламо- та хвостосховища, звалища та інші накопичувачі. Вони займають мільйони гектарів земель, є джерелом забруднення повітря, ґрунтів, підземних вод. Отже, проблема поводження з відходами є однією з найактуальніших проблем сьогодення і посідає пріоритетні позиції.

Зокрема, серед численного розмаїття промислових відходів значними є відходи деревини. В Україні щорічно заготовлюється близько

15,0 млн м³ деревини, що призводить до утворення близько 49 млн т деревних відходів, які утворюються на всіх стадіях її заготівлі, переробки та обробки [1; 2]. Значна кількість деревних відходів вже утилізується раціональним чином, чого не можна сказати про дрібнодисперсні фракції деревини та деревний пил, які в значних кількостях утворюються на технологічних лініях шліфування виробів із деревини. Ураховуючи дрібнодисперсність деревного шліфувального пилу, його слід зарахувати до 3-го класу небезпеки, адже в ньому, окрім підвищеної шкідливості на організм людини, зосереджена прихована загроза у вигляді здатності до самозаймання під час нагромадження та зберігання на територіях підприємств. Утилізація дрібнодисперсних фракцій деревини,

що утворились унаслідок шліфування деревини, а також пилу, вловленого батарейними циклонами та фільтрами, проводиться через захоронення у відвали, які займають значні земельні площі.

Розробка заходів раціонального поводження з відходами паливно-енергетичного комплексу є також актуальним завданням. Збільшення потужностей теплових електростанцій супроводжується зростанням обсягів відходів у вигляді золи та шлаку. Наразі кількість утворених відходів перевищує 1,5 млрд т, що спричиняє значне екологічне навантаження на навколишнє середовище внаслідок їх розміщення у золо- та шлаковідвалах, більшість із яких є вже майже заповненими.

Розвинені країни давно навчилися отримувати прибуток від переробки промислових відходів. Добрим прикладом є острівна Японія – країна з мінімальними запасами природних ресурсів і найвищим показником циклічності економіки. Зважаючи на сучасні світові тенденції, методи утилізації відходів мають бути раціональними, що передбачає впровадження передових технологій із залученням відходів деревообробних підприємств, зокрема дрібнодисперсних фракцій деревини та деревного пилу, а також відходів паливно-енергетичного комплексу, у вигляді золи та шлаку у виробничі процеси як цінні сировинні ресурси для виробництва нових продуктів. Такий підхід є актуальним із точки зору як раціонального використання природних ресурсів, так і охорони навколишнього середовища [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних умовах нестачі природних ресурсів утилізація відходів деревообробних підприємств та паливно-енергетичного комплексу через їх залучення у виробничі цикли (як вторинної сировини для отримання нових продуктів з упрощенням енергоефективних технологічних рішень) є важливим завданням сьогодення.

Аналіз літературних даних показав, що нині дрібнодисперсну деревину чи деревний пил використовують як енергетичну сировину для виробництва біопалива, а також в інших виробництвах як вторинну сировину для виготовлення нових матеріалів та продуктів [4]. Деревний пил може бути заміником деревного борошна – продукту, який має доволі високу собівартість, оскільки для його виробництва застосовують стадійне розмелювання деревини в млинах, що зумовлює значні енергозатрати. Зважаючи на вищесказане, доцільність використання деревного пилу є обґрунтованою для виробництва широкого різновиду термопластичних деревно-полімерних композиційних

матеріалів, лінолеумів, фенопластів (бакелітів, карболітів), арболітів, фібролітів, ксилолітів, тирсобетонів, королітів [2]. Зважаючи на тиксотропні якості деревного пилу, його застосовують як додаток під час формування клейових мас, шпаклівок, замазок. Деревний пил має виражені сорбувальні властивості, тому його використовують для виробництва сорбентів, що застосовуються в різних технологіях очищення газових і рідинних потоків від шкідливих компонентів.

Авторами робіт [5–9] пропонуються різноманітні способи утилізації відходів паливно-енергетичного комплексу. Золошлакові відходи рекомендують використовувати як добавки для виробництва цементу, бетону [10; 11]. Зола винесення придатна для одержання гіпсових в'язучих матеріалів – додавання її в сировинну суміш сприяє підвищенню міцності та водостійкості одержаних композицій [12]; золошлак може замінити високоякісну сировину під час виробництва кераміки [13]. Золошлакові матеріали володіють високою поглинальною здатністю та термічною стійкістю, що дає можливість їх використання для вловлювання парів нітратної кислоти [14], очищення стічних і поверхневих вод від нафтопродуктів [15].

Не дивлячись на розроблені та запроваджені технології застосування деревного пилу та золошлакових відходів, відомо, що в Україні лише близько 10% золошлакових відходів та близько 15% дрібнодисперсної деревини та пилу деревообробних підприємств використовуються як вторинні сировинні ресурси. Таким чином, необхідним є пошук нових сфер їх застосування, що дозволить не тільки зменшити наявну кількість вказаних відходів, а й запобігти складуванню нових партій.

Постановка завдання. Нами пропонується залучення вказаних відходів у виробництво пористих наповнювачів для легких бетонів, які (за класичною технологією) одержують способом випалювання шихти, основним компонентом якої є глина або суглинок, додатками є компоненти, здатні до вигорання за температури 800–1500°C, що сприяє формуванню пористості готового продукту [16].

На більшості ТЕС застосовують систему гідротранспорту золошлакових сумішей у відвали. Отже, золошлаки – це гідросуміші, які потребують попередньої дегідратації перед їх застосуванням як сировинних ресурсів. Проблема реалізації процесів сушіння золошлаків ТЕС полягає в тому, що внаслідок низької ефективності використання теплової енергії в барабанних сушарках, енергозатрати на процес сушіння є в декілька разів більшими, ніж це потрібно на перетворення вологи в пару. Окрім

цього, за температур теплового агенту більше 300°C, пилоподібна фракція матеріалу здатна до самозаймання, що спричиняє виробничі небезпеки.

Запропонований нами метод фільтраційного сушіння золошлаків ТЕС дає змогу використати низькотемпературний тепловий агент; зменшити втрати матеріалів з відпрацьованим сушильним агентом, оскільки найдрібніші частинки будуть втримуватись стаціонарним шаром; зменшити споживання енергії в процесі сушіння, оскільки значна кількість вологи з матеріалу буде механічно витіснятися та виноситись рухомих тепловим агентом внаслідок перепаду тисків; інтенсифікувати процеси масо- та теплопередачі за допомогою збільшення швидкості руху теплового агенту до науково обґрунтованих меж. Таким чином, застосування фільтраційного методу для сушіння золошлаку позитивно вплине на собівартість готової продукції. Для розробки науково обґрунтованих режимів фільтраційного сушіння золошлаку, як складника шихти для виробництва пористих наповнювачів, необхідним є проведення досліджень кінетики процесу з метою визначення тривалості процесу та встановлення параметрів інтенсифікації.

Метою статті є оцінка можливості використання деревного пилу та золошлаків ТЕС як ресурсів сировини для виготовлення легких наповнювачів; дослідження основних закономірностей кінетики фільтраційного сушіння золошлаку ТЕС за різних швидкостей руху теплового агенту з метою інтенсифікації;

дослідження фізико-механічних властивостей пробної партії легких наповнювачів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

У роботі об'єктами дослідження вибрано деревний пил, утворений у цеху шліфування деревини та золошлак теплової електростанції. Дослідження проводилися на основі аналізу та систематизації наукових уявлень про фактори, що впливають на створення наповнювачів на основі вторинних сировинних ресурсів, методів, направлених на поліпшення фізико-механічних властивостей.

Деревний пил. Хімічний склад деревного пилу відповідає складу вихідної деревини, основним компонентом якого є целюлоза (48–53% від загального складу). Дисперсний склад пилу визначали за допомогою приладу X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78, на основі чого встановлено, що понад 80% складу деревного пилу, утвореного внаслідок процесів шліфування заготовок із масиву деревини, представлено дрібнодисперсною фракцією. Насипна щільність деревного пилу залежить від багатьох факторів (вологість, розміри і форми частинок, порода деревини) і перебуває в межах 110–120 кг/м³. На рис. 1 наведені інтегральні криві розподілу часток пилу в пробах, відібраних одночасно на дільниці шліфування меблевих заготовок із масиву деревини.

Порівнюючи розміщення кривих на координатній сітці (рис. 1), можна зробити висновок про те, що їх положення залежить від максимального

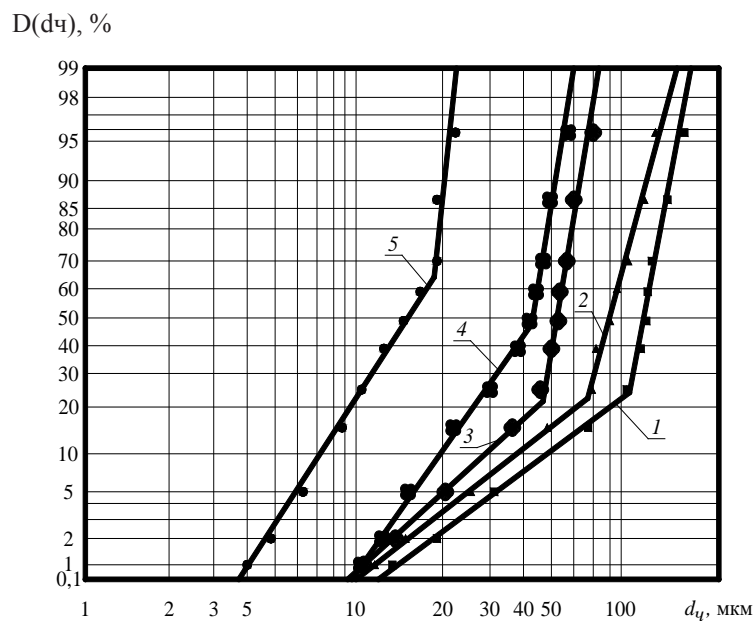


Рис. 1. Криві розподілу частинок деревинного пилу:
 1 – в системі аспірації; 2 – від шліфувального барабана;
 3 – до батареї циклонів (сума 1 і 2);
 4 – після батареї циклонів; 5 – після фільтру

діаметра частинок пилу. На основі узагальнення результатів досліджень, отримано залежність, яка дає змогу розрахувати максимальний діаметр частинки пилу, що аспірується від шліфувального верстата:

$$\delta_{\max} = \frac{3}{g} \sqrt{\frac{2 \cdot \eta \cdot U_{\text{вх}}}{1 + 0,08 \cdot \frac{U_{\text{вх}} \cdot L}{U_0 \cdot H}}} \quad (1)$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря, Па·с; $U_{\text{вх}}$ – швидкість повітряного потоку при вході в зону аспіраційного укриття, м/с; U_0 – швидкість повітряного потоку в зоні аспіраційного укриття, м/с; L та H – довжина і висота зони аспіраційного укриття відповідно, м.

Отримані дані у вигляді рис. 1 та залежності (1) дають уявлення про об'єкт дослідження та є корисними для розроблення заходів щодо утилізації пилу підприємства.

Золошлак. Для визначення хімічного складу золошлакових відходів, що є необхідним для передбачення його властивостей, проби були відібрані з золошлакового відвалу та електричних фільтрів ТЕС. Хімічний склад золошлаку, визначений методом рентгенофлуоресцентної спектроскопії, наведений у таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад золошлаку, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Проба з місця складування								
50,8%	21,4%	20,5%	0,7%	3,0%	1,2%	0,3%	0,6%	1,5%
Проба з електрофільтру								
50,4%	20,9%	20,8%	0,5%	4,5%	1,1%	0,2%	0,3%	1,3%

Загалом, золошлак за своїм складом є ідентичний до глини – природної сировини, що дає змогу його введення в склад шихти для виробництва пористих наповнювачів. Під час оцінювання золошлакових відходів, як сировинного компонента шихти для виготовлення легких наповнювачів, важливою характеристикою їх хімічного складу є співвідношення основних та кислотних оксидів, що виражається модулем основності: $M_0 = (\text{CaO} + \text{MgO}) : (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$. У відібраних зразках золошлаку $M_0 < 1$, що вказує на їх кислий тип, який зумовлює послаблені формувальні властивості.

Гранулометричний склад золошлаку, що є однією з основних його характеристик як сировинного матеріалу, визначений за допомогою ситового аналізу і представлений на рис. 2. Результати розподілу частинок за розмірами вказують на тонкодисперсність золошлаку, що зумовлює його пластичність (властивість склеювання) і позитивно впливатиме на міцність виробів.

Масова частка

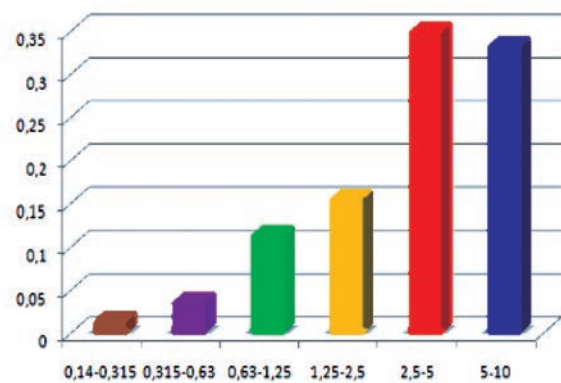
 $d_i \cdot 10^3, \text{ м}$

Рис. 2. Гранулометричний склад золошлаку

Беручи до уваги хімічний склад, модуль основності та гранулометричний склад золошлаку, зроблено висновок про можливість його застосування в складі шихти для виробництва легких наповнювачів. Для підвищення формульної здатності зразків наповнювача, частину сировинного глинистого матеріалу можна замінити золошлаком, уводячи при цьому в склад шихти незначну кількість затверджувачів.

Середній вологовміст золошлаку, відібраного з місць складування, становить 0,28 кг H₂O/кг сух. мат. і зумовлений наявністю вологи в середині пористої структури частинок, поверхневої вологи та вологи міжзернового простору між окремими частинками, що втримується силами поверхневого натягу. Для застосування як сировинного компонента шихти золошлак необхідно висушити до рекомендованої вологості.

Дослідження кінетики процесу сушіння золошлаку фільтраційним методом проводили на експериментальній установці [17]. На перфорованому дні циліндричного контейнера формували стаціонарний шар золошлаку, для сушіння якого тепловий агент, попередньо нагрітий у калорифері, подавали в напрямку «вологий матеріал – перфороване дно контейнера». Проведено серію експериментів за різних витрат теплового агента, які реєструвались електронним витратоміром. Експерименти проводились до досягнення сталої маси зразка.

Результати досліджень впливу швидкості руху теплового агента, зумовлених різною витратою, на зміну вологовмісту шарів золошлаку в часі під час реалізації процесу фільтраційного сушіння представлені на рис. 3 у вигляді графічних залежностей. Висота шару та температура теплового

агенту для матеріалу вибиралися як оптимальні, виходячи з попередньо проведених розрахунків енергозатрат та характеристик матеріалу.

w^c , кг H_2O /кг сух. м.

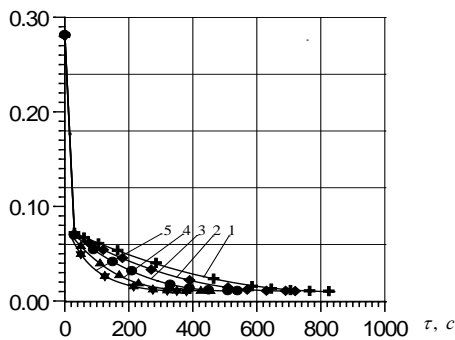


Рис. 3. Зміна вологовмісту стаціонарного шару шлаку в часі ($H=120 \cdot 10^{-3}$ м; $T=353$ К):
 1 – $v_0 = 0,63$ м/с; 2 – $v_0 = 0,98$ м/с; 3 – $v_0 = 1,33$ м/с;
 4 – $v_0 = 1,67$ м/с; 5 – $v_0 = 2,02$ м/с

Аналіз рис. 3 показує, що збільшення швидкості теплового агента від 0,63 до 2,02 м/с, дає змогу скоротити час сушіння у 2,2 раза. Прямолінійна ділянка на рис. 3 вказує на наявність періоду механічного витіснення та винесення поверхневої вологи, яка втримується частинками золошлаку за рахунок сил поверхневого натягу, а також вільної вологи, що міститься в проміжках між частинками, зі стаціонарного шару матеріалу рухомим тепловим агентом. Це явище забезпечуватиме зменшення енергозатрат на реалізацію процесу фільтраційного сушіння. Отримані результати є корисними для організації та інтенсифікації процесу фільтраційного сушіння золошлаку як попередньої стадії на лінії з виробництва пористих наповнювачів.

Зразки наповнювача. Ураховуючи вищесказане та згідно з рекомендаціями, представленими в літературі, для формування зразків легких напо-

внювачів обрано такий склад шихти: золошлакові відходи (35–45%) (попередньо висушені фільтраційним методом), глина (55–45%), деревний пил (10%). На основі обраних складів шихти отримано пробну партію легких наповнювачів із застосуванням затверджувача. Первинна пористість у сформованих зразках виникала після гранулювання шихти. Зразки поміщали в муфельну піч і за температури 1000 К відбувалося випалювання дрібнодисперсної деревини, а також усередині гранул утворювалась газоподібна фаза, яка створювала надлишковий тиск у внутрішньому просторі, що сприяло пароутворенню. Беручи до уваги фізико-механічні властивості наповнювачів (Табл. 2), вони можуть бути рекомендованими для виробництва легких бетонів.

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості наповнювачів

Уміст глини, %	Уміст деревного пилу, %	Уміст золошлаку, %	Теплопровідність, Вт/м К	Міцність на стиск, МПа
55	10	35	0,23	2,25
50	10	40	0,18	1,58
45	10	45	0,14	1,08

Висновки. Запропонований метод утилізації золошлаку та деревного пилу створить умови для безвідходного виробництва деревообробних підприємств та об'єктів паливно-енергетичного комплексу, дасть змогу рекультивувати земельні площі відведені під звалища, розширить сировинну базу виробництва пористих наповнювачів для бетонів. Запропонований метод фільтраційного сушіння золошлаку сприятиме зменшенню енерговитрат на лінії сушіння, що позитивно вплине на собівартість готової продукції.

Список літератури:

1. Масікевич А.Ю., Масікевич Ю.Г. Перспективи утилізації відходів деревини у Чернівецькій області. *Екологічна безпека*. 2011. № 2(12). С. 63–66.
2. Повзун О.І., Подкопаєв С.В., Вірич С.О. Горячева Т.В., Дорох С.Г. Утилізація відходів полімерного та лісохімічного виробництва у дорожньому будівництві. *Екологічна безпека*. 2016. № 2(22). С. 102–111.
3. Шмандий В.М. Пляцук Д.Л. Передумови побудови моделі імовірнісного розподілу забруднюючих речовин в атмосфері. *Екологічна безпека*. 2014. № 2(18). С. 56–60.
4. Ялечко В.І. Можливість використання деревних відходів як альтернативного палива для котельних установок. Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні. зб. наук. праць X-ї Міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 4–5 квітня. 2019 р. Львів, 2019. С. 146–148.
5. Ahmaruzzaman M. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010. Vol. 36. P. 327–363.
6. Yao Z. T., Ji X. S., Sarker P. K., Tang J. H., Ge L. Q., Xia M. S., Xi. Y. Q. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*. 2015. Vol. 141. P. 105–121.
7. Blissett R.S., Rowson N.A. A review of the multicomponent utilisation of coal fly ash. *Fuel*. 2012. Vol. 97. P. 1–23.

8. Sett R. Flyash: characteristics, problems and possible utilization. *Advances in Applied Science Research*. 2017. Vol. 8 (3). P. 32–50.
9. Адеева Л.Н., Борбат В.Ф. Зола ТЭЦ – перспективное сырье для промышленности. *Вестник Омского университета*. 2009. № 2. С. 141–151.
10. Энтин З.Б., Нефедова Л.С., Стржалковская Н.В. Зола ТЭС – сырье для цемента и бетона. *Цемент и его применение*. 2012. № 2. С. 40–46.
11. Капустин А.Ф., Семериков И.С. Состав и свойства композиционного цемента с добавкой золошлаковой смеси ТЭС. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. 2011. № 16 (12). С. 38–40.
12. Шарифов А., Субхонов Д.К., Шодиев Г.Г., Бобоев Т.С. Использование золы угля Фан-Ягнобского месторождения в качестве наполнителя композиций из гипсовых вяжущих. *Доклады Академии наук Республики Таджикистан*. 2016. Т. 59. № 9–10. С. 413–417.
13. Albertini A.V.P., Silva J.L., Freire V.N. Immobilized invertase studies on glass-ceramic support from coal fly ashes. *Chemical Engineering Journal*. 2013. Vol. 214, P. 91–96.
14. Федорова Н.В., Щеглов Ю.В., Антоненко Е.М. Исследование сорбирующих свойств золошлаковых материалов ТЭС по отношению к парам азотной кислоты. Сорбционные и хроматографические процессы. 2012. Т. 12. № 3. С. 399–408.
15. Шишелова Т.И., Самусева М.Н., Шенькман Б.М. Использование ЗШО в качестве сорбента для очистки сточных вод. *Современные наукоемкие технологии*. 2008. № 5. С. 20–22.
16. Хлопицкий О.О. Стан, проблеми та перспективи переробки золошлакових відходів теплоелектростанцій України. *ScienceRise*. 2014. № 4/2(4). С. 23–28.
17. Hosovskyi R., Kindzera D., Atamanyuk V. Diffusive mass transfer during drying of grinded sunflower stalks. *Chemistry & Chemical Technology*. 2016. Vol. 10(4), P. 459–464.

Kindzera D.P., Somar H.V. APPLICATION OF WOOD DUST AND ASH-SLAG OF THERMAL POWER PLANTS FOR PRODUCTION OF LIGHTWEIGHT AGGREGATES

Review of literature data showed that one of the rational method of wood dust and ash-slag waste utilization is to involve them in to production processes, which corresponds to current trends in technology in industrialized countries. This approach makes it possible to reduce the number of dumps and prevent further accumulation of wastes. Therefore, the main benefits of using such wastes in the production process are environmental protection and conservation of raw resources for the production of finished products. The technology for production of lightweight aggregates for concrete by using ash-slag waste of thermal power plants and wood dust of woodworking enterprises as raw materials have been proposed. Part of the clay material, which is the main component of the charge according to the classic technology of aggregate production, can be replaced by ash slag, due to the close content of the main chemical components. The introduction of wood dust into the charge will promote the formation of porosity of aggregates during its burning at high temperatures. Ash-slag wastes, which are hydraulic mixtures, should be dried due to the high moisture content. Since the energy consumption of drying processes is significant, finding alternative drying methods is an urgent task. To implement the drying process of ash-slag, the filtration drying method has been proposed which gives an opportunity to intensify mass and heat transfer processes and to reduce drying time. The thermal agent velocity effect on the drying process duration of ash-slag was investigated. Kinetic curves for ash-slag show periods of mechanical displacement and removal of moisture. Therefore, drying of the ash-slag wastes, by the filtration method will reduce energy consumption due to the displacement and removal of significant amount of moisture by the moving thermal agent due to the pressure drop. The drying kinetics results are useful for the organization and intensification of the process as a preliminary stage step at the lightweight aggregates production line. Samples of porous aggregates were prepared by using a charge of different composition. The samples of lightweight aggregates were tested for physical and mechanical properties, namely for thermal conductivity and compression strength. Obtained aggregates are recommended for the production of lightweight concretes.

Key words: ash-slag waste, wood dust, utilization, lightweight aggregates, filtration drying, lightweight concrete.