

УДК 667.11.021

**В.В.Тарасюк, асп., В.Ф.Дідух, проф., д-р техн. наук**  
*Луцький національний технічний університет*

## Дослідження переносу теплоти від нагрітої поверхні до гранул ОМД кулястої форми

У статті обґрунтовано необхідність застосування двох етапів формування гранул ОМД на основі сапропелю методом обкочування. При цьому на другому етапі коливна поверхня нагрівається вмонтованими у неї нагрівальними елементами, що забезпечує як ущільнення поверхневих шарів гранули, так і її затвердіння. Отриманні формули для визначення кількості теплоти, що сприймається гранулою через площу контакту до нормованого значення вологості.

**метод, обкочування, органо-мінеральні добрива, сапропель, перенос, теплота, вологість**

Збереження та підвищення родючості ґрунтів на території України залежить від вибору раціональних технологічних процесів вирощування сільськогосподарських культур, серед яких перспективними є технології, які включають локальне внесення твердих органо-мінеральних добрив[1]. На сьогодні, за відсутності підстилкового гною, головним постачальником органічної речовини можуть стати озерні сапропелі. Вносять озерні сапропелі у чистому вигляді у випадках їх проморожування після наміву пульпи, або у складі компостів з іншими видами добрив. Проте ефективне використання сапропелів можливе при використанні їх як основи при виробництві органо-мінеральних добрив[2].

Вибір методу формування таких гранул залежить від властивостей компонентів матеріалу, який гранулюють. У нашому випадку сапропель є матеріалом вологістю 80-85%, а НРК можна вважати абсолютно сухим. Тому аналіз попередніх досліджень показав, що раціональним методом поєднання таких матеріалів є метод обкочування, а зрізи гранули під мікроскопом, після завершення процесу, про рівномірність розподілу мінеральної частини у сапропелевій матриці[3].

На основі аналізу відомих конструкцій грануляторів, у яких закладено метод формування гранул обкочуванням, запропонована принципова схема гранулятора з основними такими вузлами як: рама, коливна поверхня, пристрої для подачі частинок довільної форми та виведення готових гранул кулястої форми, привід коливної поверхні[4]. Коливна поверхня, на якій відбувається перетворення частинок довільної форми у кулясту умовно розділена на дві зони: гладку та ребристу. При цьому передбачено також нагрівання поверхні у другій зоні та ізоляцію поверхні від навколишнього середовища. Встановлено, що при нагріванні поверхні до 110 °С температура у сушильній камері становить 40-45°С. В процесі обкочування гранул на коливній робочій поверхні на першому етапі відбувається їх перетворення з частинок довільної форми у кулясту а також перерозподіл вологи за радіусом і часткове їх зневоднення. У другій зоні на ребристій частині поверхні завершується процес формування гранул зі зниженням вологовмісту до нормованого значення з метою отримання максимальної необхідної твердості.

При виробництві таких органо-мінеральних добрив важливо забезпечити точність дозування компонентів ОМД, які впливають як на структуру окремих гранул, так і на кінцеві фізико-механічні властивості. Тому, для даних досліджень цікавим є перевірка всіх можливих варіантів поєднання у гранули органічної частини із

сапропелю та мінеральної NPK. Кожен із варіантів: сапропель+ NPK, сапропель+ N, сапропель+ P, сапропель+ K вимагає також вибору своїх режимних параметрів при формуванні гранул, серед яких основними є температурні. Таким чином, розробка методики розрахунку перенесення теплоти від нагрітої поверхні до гранул ОМД кулястої форми є важливим питанням.

**Мета.** На основі аналізу відомих результатів досліджень перенесення теплоти від нагрітої поверхні до матеріалу, що знаходиться на ній, запропонувати методику розрахунку переносу теплоти від нагрітої поверхні до гранул ОМД кулястої форми.

Використання комбінованого методу зневоднення ОМД, при якому на другому етапі сушіння передбачається застосування передачі тепла до гранул від нагрітої поверхні дозволить не тільки зменшити їх вологість, але й забезпечити необхідну твердість гранул. Проте основним фізичним ефектом при формуванні гранул ОМД у запропонованому технологічному процесі є забезпечення інтенсивності переносу теплоти для зниження енергетичних витрат на отримання кінцевої продукції. Для розробки моделі взаємодії окремих частинок гранул, наближених до форми кулі, з нагрітою поверхнею, необхідно прийняти ряд допущень:

- гранули ОМД переміщуються по нагрітій поверхні лише через лінію дотику;
- миттєвий контакт гранули з нагрітою поверхнею відбувається через точку дотику;
- коефіцієнт теплопередачі  $\alpha_m$  для всіх гранул однаковий та близький за величиною до інших матеріалів, а також близький за властивостями та розмірами, що обумовлено загальним фізичним механізмом перенесення теплоти;
- контакту між сусідніми гранулами в процесі сушіння не відбувається.

Таким чином, центральне місце у моделюванні зовнішнього теплообміну в дисперсних середовищах займає аналіз теплопередачі від нагрітої поверхні до об'єкта зневоднення – гранул ОМД. Очевидно, що загальний тепловий потік  $Q_{заг.}$  від нагрітої поверхні до гранули визначатиметься через площу дотику  $S_d$ , мінімальне та максимальне значення якої визначатиметься за один оберт гранули навколо центра  $O$  її обертання, (рис.1):

$$S_{d \min} = \varphi \cdot R \cdot dl, \quad (1)$$

$$S_{d \max} = 4\pi \cdot R^2. \quad (2)$$

Наявність вологи у гранулі зумовлює високу її теплопровідність  $\lambda_{сп.}$ , при цьому теплопровідність  $\lambda_n$ , нагрітої до високої температури незначна. Тому, у точці контакту виникатиме градієнт температури, який визначатиме максимальну потужність теплового потоку, що буде спрямований до центра гранули. У випадку, коли  $V_{сп.} = 0$ , вирівнювання температур поверхні та гранули відбуватиметься по ексцентричних колах у перерізі гранул.

При переміщенні гранули по нагрітій поверхні, за один оберт навколо т.О, кількість дотиків гранули до поверхні виразиться площею контакту, що визначатиметься, за формулою 1. З іншої сторони, величина площі контакту, визначається аналогічно [7]:

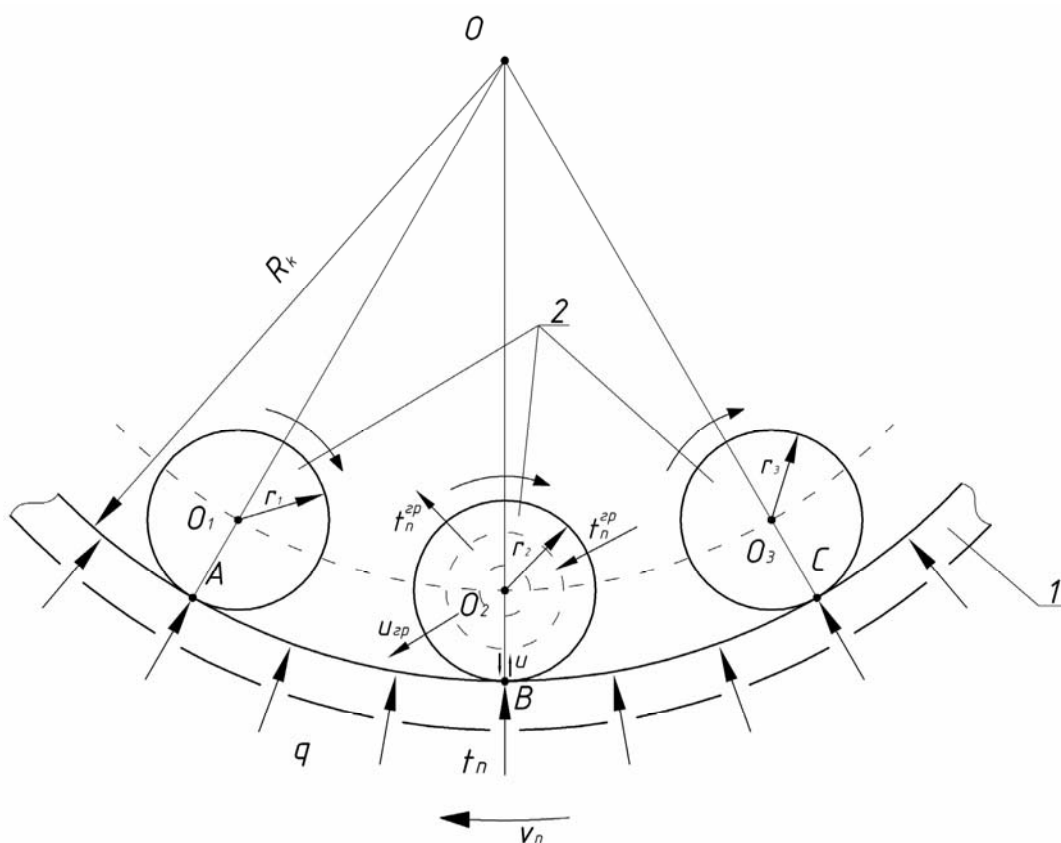
$$S_{d \min} = \varphi \cdot R \cdot dl = \sqrt{\left( \frac{1 - \mu_n^2}{E_n} - \frac{1 - \mu_{сп.}^2}{E_{сп.}} \right)} P_k \cdot R, \quad (3)$$

де  $\mu_n, \mu_{сп.}$  – відповідно коефіцієнти Пуассона нагрітої поверхні та гранули;

$E_n, E_{сп.}$  – модулі пружності нагрітої поверхні та гранули;

$P_k$  – максимальний тиск між нагрітою поверхнею та гранулою;

$R$  – радіус гранули, м.



1 – робоча поверхня; 2 – гранула

Рисунок 1 – Схема до розрахунку перенесення теплоти від нагрітої криволінійної поверхні до сформованої гранули кулястої форми

Площа контакту «поверхня – гранула» при  $V_{zp.} = 0$ ,  $S_d \rightarrow \min$ , тому ефективний тепловий потік  $Q_{заг.эф.}$ , що передається гранулі, за час повного обертуту гранули навколо центра O визначатиметься, як:

$$Q_{заг.эф.} = \sum_{i=1}^n q_i + q_{\phi}, \quad (4)$$

де  $q_i$ ,  $q_{\phi}$  – відповідно щільність теплового потоку в точці дотику гранули до нагрітої поверхні та щільність теплового потоку на стадії фазового перетворення вологи у гранулі;

$n$  – кількість контактів при обертанні гранули навколо центра O.

Щільність теплового потоку, який передається від нагрітої поверхні до гранули за визначений час визначається відповідно до закону Фур'є:

$$q_i = -\lambda_{zp.} \frac{\partial t_{zp.}(y, \tau)}{\partial y} = -\frac{\lambda_{zp.} \cdot (t_{n.zp.} - t_{n.n.})}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_{zp.} \cdot c_{zp.} \cdot \rho_{zp.}}{\lambda_{n.n.} \cdot c_{n.n.} \cdot \rho_{n.n.}}}} \frac{\partial \left( e \cdot r \cdot f \cdot \frac{y}{2\sqrt{a_{zp.} \cdot \tau}} \right)}{\partial y} = \sqrt{\frac{\lambda_{zp.} \cdot c_{zp.} \cdot \rho_{zp.}}{\pi \cdot \tau}} \frac{(t_{n.n.} - t_{n.zp.})}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_{zp.} \cdot c_{zp.} \cdot \rho_{zp.}}{\lambda_{n.n.} \cdot c_{n.n.} \cdot \rho_{n.n.}}}}, \quad (5)$$

де  $\lambda_{zp.}$  – коефіцієнт теплопровідності вологої гранули, [кДж/(м·К)];

$\lambda_{n.n.}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу нагрівальної поверхні, [кДж/(м·К)];

$c_{zp.}$ ,  $c_{n.n.}$  – відповідно питомі теплоємності вологої гранули та матеріалу нагрівальної поверхні, (Дж/кг·°С);

$t_{n.zp.}$ ,  $t_{n.n.}$  – температури на поверхні гранули та нагрівальної поверхні, °С;

$a_{ep.}$  – коефіцієнт температуропровідності вологої гранули,

$\rho_{ep.}$ ,  $\rho_{н.н.}$  – відповідно щільність гранули та густина матеріалу нагрівальної поверхні, кг/м<sup>3</sup>.

Кількість теплоти, що сприймається однією гранулою, за час  $\tau$  її зневоднення до нормованого значення через площу  $S_{ep.}$ , яка визначається за формулами 1 і 2, визначається:

$$Q_{ep} = \int_0^{\tau} \int q_i dS d\tau = \sqrt[2]{\frac{\lambda_{ep.} \cdot c_{ep.} \cdot \rho_{ep.} \cdot \tau}{\pi}} \cdot S_{ep.} \cdot \frac{(t_{н.н.} - t_{н.еп.})}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_{ep.} \cdot c_{ep.} \cdot \rho_{ep.}}{\lambda_{н.н.} \cdot c_{н.н.} \cdot \rho_{н.н.}}}} \quad (6)$$

Сумарна кількість теплоти, яка одночасно передається шару гранул ОМД розміщених на нагрівальній поверхні з врахуванням зміни їх розмірів та вологовмісту, визначатиметься за формулою:

$$Q_{заг.} = \sum_{i=1}^n \sqrt[2]{\frac{\lambda_{ep.} \cdot c_{ep.} \cdot \rho_{ep.} \cdot \tau}{\pi}} \cdot \frac{\delta_s}{(u_n - u_k) - \delta_s \cdot u_n} \cdot \frac{(t_{н.н.} - t_{н.еп.})}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_{ep.} \cdot c_{ep.} \cdot \rho_{ep.}}{\lambda_{н.н.} \cdot c_{н.н.} \cdot \rho_{н.н.}}}} \quad (7)$$

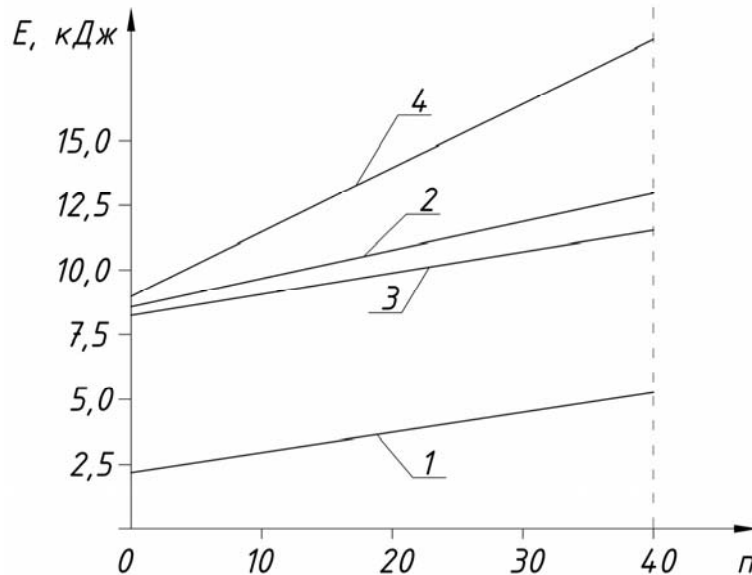
де  $\delta_s = (S_n - S_k)/S_n$  – відносна усадка гранули кулястої форми при зміні її вологовмісту від початкового  $u_n$  до кінцевого  $u_k$  значення.

Питомі енергетичні затрати у кДж при зневодненні гранул ОМД кулястої форми визначимо за формулою:

$$E = \frac{Q_{заг.}}{W} \quad (8)$$

де  $W$  – пропускна здатність коливної нагрітої поверхні, кг/год.

Проведений розрахунок енергетичних затрат виконаний за допомогою прикладних програм на ПК. Результати розрахунків представлені на рис. 2.



1 – Сапропель + НРК; 2 – Сапропель + N; 3 – Сапропель + P; 4 – Сапропель + K

Рисунок 2 – Питомі енергетичні витрати на зневоднення гранули в залежності від кількості коливань робочої поверхні.

Аналіз графічних залежностей показує, що ефективність зниження вологості у гранульованих ОМД знаходяться у прямолінійній залежності від різниці вологовмістів,

складу гранул, який впливає на її щільність, а також теплопровідність поверхневого шару гранули. Таким чином, проведені дослідження вказують на необхідність застосування комбінованого способу отримання гранул ОМД кулястої форми із зниженням до нормованої вологості. На першому етапі перетворення частинок довільної форми у частинки, що наближаються до форми кулі, та одночасним конвективним сушінням до затвердіння гранули. На другому етапі застосування кондуктивного сушіння з одночасним перекочуванням гранул нагрітою поверхнею для отримання необхідної твердості гранул та нормованої вологості.

#### Список літератури

1. П.В. Сисолін. З бажанням зберегти родючість української землі та допомогти селянину. Зб. статей, виступів та коментаріїв (1997 – 2008рр.). – Кіровоград, 2009. – 160с.
2. П.В. Классен, І.Г. Гришаев, И.П. Шомин. Гранулирование. – М.: Химия, 1991. – 240с.
3. Тарасюк В.В. /В.В.Тарасюк, В.Ф.Дідух, І.В. Тараймович// Зб.наук. статей. “Сільськогосподарські машини”. Визначення інтенсивності зневоднення частинок ОМД на етапі формування гранул. – Луцьк.: РВВ Луцького НТУ, 2011. – Вип.. 21, Т.2. С.130 – 134.
4. Тарасюк В.В. /В.В.Тарасюк, В.Ф.Дідух, І.В. Тараймович// загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. “Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин”. Конструктивні особливості формування гранул при виробництві ОМД на основі сапропелю. – Кіровоград., 2010. – Вип.. 40, Ч.2. С.226 – 230.
5. <http://www.saprex.ru>
6. <http://www.sapropek.narod.ru>
7. Скринік І.О. Обґрунтування параметрів зерносушарки каскадного типу для обробки насіння у киплячому шарі: Дис....канд.техн.наук: 05.05.11– машини та засоби механізації сільськогосподарського виробництва. Кіровоград – 2010.

*В. Тарасюк, В. Дідух*

#### **Исследование переноса тепла от нагретой поверхности к гранулам ОМД шарообразной формы**

В статье обосновано необходимость применения двух этапов формирования гранул ОМД на основании сапропеля методом окатывания. При этом на втором этапе колебательная поверхность имеет свойства нагреваться с помощью вмонтированных у неё нагревательных элементов, что обеспечивает не только уплотнение поверхностных слоёв гранул, но и необходимую твердость. Получены формулы для расчёта количества теплоты, которую получают гранулы через площадь контакта при снижении влажности до нормированного значения.

*V.Tarasyuk, V. Didukh*

#### **The Investigation Of Heat Transfer From The Heated Surface To The OMF Spherical Granules**

The article justified the need for two stages of OMF granule formation based on sapropel by the rolling method. Herewith during the second phase the oscillating surface has a possibility to heat up by the heating elements that are mounted inside it, which provides not only sealing of the granules surface layers, but also the necessary firmness too. We obtain formulas for calculating the amount of heat, which the granules receive through the contact area with a decrease in humidity up to a normalized value.

Одержано 19.09.11