

9. Placette, Mark D. A Dual Stage Model of Anomalous Diffusion and Desorption in Epoxy Mold Compounds [Text] : Int. Conf. on Thermal / Mark D. Placette, Jie – Hua Zhao // Mechanical and Multiphysics Simulation in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE, 2011. – P. 1–8.
10. Petropoulos, John H. How Best to Deal non – Fickian Behavior in a Fickian Spirit [Text] / John H. Petropoulos, Merope Sanapoulou, Beyond Fick // Diffusion – fundamentals. Org. 11. – 2009. – Vol. 5. – P. 1–21.
11. Allan, F. M. Handbook of Solubility Parameters [Text] / F. M. Allan, Ph. D. Barton. – CRC Press, 1983. – P. 153–157.
12. Klover, M. H. Polymers: Bibliographic Review [Text] / M. H. Klover, B. Flaconneche // Oil & Gas Science and Technology, Rev. IFP. – 2001. – Vol. 56, № 3. – P. 223–224.

Розглянуто спосіб зниження розчинності азотовмісних добрив шляхом покриття гранул органічною оболонкою. Приведені перспективи використання в якості матеріалу оболонки суспензії курячого посліду. На підставі проведених досліджень встановлено механізм та режими росту гранул у псевдозрідженому шарі. Отримано загальний вигляд рівняння, яке аналітично описує функцію щільності розподілу гранул за розмірами в процесі капсулювання

Ключові слова: капсулювання, киплячий шар, суспензія, курячий послід, температурний режим, функція розподілу

Рассмотрен способ снижения растворимости азотсодержащих удобрений путем покрытия гранул органической оболочкой. Приведены перспективы использования в качестве материала оболочки суспензии куриного помета. На основании проведенных исследований установлены механизм и режимы роста гранул в псевдооживленном слое. Получен общий вид уравнения, которое аналитически описывает функцию плотности распределения гранул по размерам в процессе капсулирования

Ключевые слова: капсулирование, кипящий слой, суспензия, куриный помет, температурный режим, функция распределения

УДК 661.152.4

КАПСУЛЮВАННЯ АЗОТОВМІСНИХ ДОБРИВ СУСПЕНЗІЄЮ КУРЯЧОГО ПОСЛІДУ В АПАРАТІ КИПЛЯЧОГО ШАРУ

Р. О. Острога
Аспірант*

E-mail: ruslan-ostroga@yandex.ru

М. П. Юхименко

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: yunp@ukr.net

*Кафедра процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв Сумський державний університет вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна, 40007

1. Вступ

Серед всіх існуючих видів мінеральних добрив саме азотовмісні (насамперед, аміачна селітра, карбамід, діамонійфосфат) відіграють вирішальну роль у підвищенні врожаю всіх сільськогосподарських культур. Зростання і розвиток, утворення нового листя, коріння, квіток, плодів та інших органів залежать від достатнього надходження азоту [1, 2].

Також слід зазначити, що в цих добривах азот знаходиться в дуже рухливій формі. А тому, поряд з позитивними якостями (висока концентрація основних поживних елементів) вони мають суттєвий недолік – значна розчинність у ґрунті, що може призвести до створення умов пригнічення росту та розвитку рослин, а також сприяє вимиванню добрив з ґрунту. При цьому значно зменшується коефіцієнт використання добрив.

Таким чином, азотовмісні добрива більш за інші потребують покриття їх поверхні органічною речовиною: азот, що входить до складу деяких добрив, залучається в шар компонентів з відносно низькою розчинністю, що забезпечує довготривалість його дії на ґрунт та рослину [3].

Перспективним є в якості вихідного матеріалу для органічної оболонки використовувати курячий послід. Це концентрована органічна речовина, що містить всі основні поживні елементи: азот (0,7 – 1,9 % мас.), фосфор (1,6 – 2,0 % мас.), калій (0,8 – 1,0 % мас.), а також багато макро- і мікроелементів. Концентрація натрію, магнію і кальцію у ньому в 6 – 9 разів більша, ніж у безпідстилковому гної худоби, вміст цинку становить 215, міді – 33 і марганцю – 183 мг на 1 кг посліду [4].

Тваринницькі відходи мають природну липкість, завдяки чому при набризкуванні їх на поверхню мінеральної речовини відбувається гарне злипання і не

треба додатково вводити спеціальну хімічну речовину для підвищення зхватуваності мінеральної гранули з органічним покриттям [5].

Отже, залучення курячого посліду в біохімічний кругообіг сприяє, з одного боку, розширенню сировинної бази для виробництва нових добрив, а з іншого, – його утилізації [6].

2. Літературний огляд і постановка проблеми

Процес капсулювання азотовмісних добрив суспензією курячого посліду найбільш раціонально здійснювати в апаратах киплячого (псевдозрідженого) шару з форсуноковим розпиленням.

Розробку та впровадження апаратів з киплячим шаром на багатьох виробництвах стримує відсутність надійних методів їх розрахунку. Одна з основних причин – недостатня вивченість складних і різноманітних процесів у киплячому шарі. Математична модель дозволяє встановити межі регулювання процесу, а також мінімізує застосування додаткових засобів автоматизації. Тому останнім часом велика увага приділяється побудові принципів математичних моделей [7, 8].

Принцип киплячого шару використовується в апаратах різних конструкцій, що працюють при різних технологічних режимах. Однак, процеси росту (укрупнення) і ущільнення гранул підкоряються одним аналітичним законам. Основні залежності для розрахунку швидкості росту гранул, що запропоновані до теперішнього часу, базуються на їх рівномірно-поверхневому зростанні і орієнтовані на монодисперсний шар гранул. Але гранульовані мінеральні добрива, які випускаються промисловістю, мають полідисперсний склад. Отже, актуальним є розробка математичної моделі, яка також враховує зміну щільності розподілу гранул за розмірами в процесі їх капсулювання органічною оболонкою [9].

Співставлення розробленої математичної моделі з результатами експерименту дасть змогу розкрити фізичний механізм процесів, які протікають на окремій гранулі та в шарі в цілому. Тобто експериментально підтверджена математична модель дозволяє виявити шляхи управління та оптимізації технології капсулювання гранульованих продуктів [7].

3. Дослідження процесу капсулювання у киплячому шарі

3.1. Методика проведення експериментів

Дослідження процесу капсулювання гранульованих мінеральних добрив органічною оболонкою проводилися на лабораторній установці (рис. 1). У якості вихідного продукту використовувалося гранульоване мінеральне добриво – карбамід. Для визначення його гранулометричного складу попередньо проводився ситовий аналіз: матеріал завантажувався на сито з отворами діаметром 3,5 мм і шляхом вібрації поділявся на дві частини – залишок та прохід. Прокід, у свою чергу, завантажувався на наступні сита у порядку зменшення діаметру отворів (3 мм; 2,5 мм; 2 мм; 1,5 мм; 1 мм). У такий спосіб навіска гранул карбаміду поф-

раційно розподілялася за розмірами. Після закінчення просіву кожна отримана фракція зважувалася.

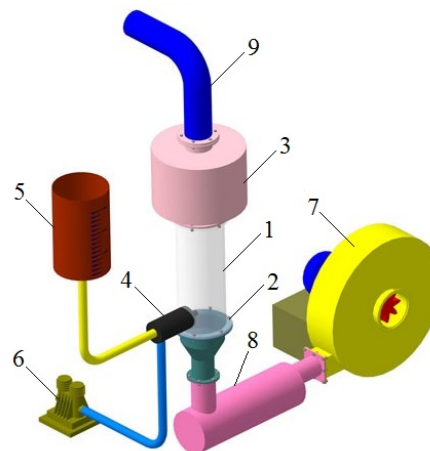


Рис. 1. Модель експериментальної установки для капсулювання мінеральних добрив: 1 – продуктова камера; 2 – газорозподільна решітка; 3 – кришка апарата; 4 – пневматична форсунка; 5 – мірний бачок; 6 – компресор; 7 – газодувка; 8 – електрокалорифер; 9 – з'єднувальна труба

До складу установки входить продуктова камера 1, яка виконана з органічного скла, що уможливує візуалізацію досліджуваного процесу. Полідисперсна навіска карбаміду, з мінімальним діаметром гранул 1,5 мм, подавалася на газорозподільну решітку 2. Завдяки висхідному потоку повітря, генерованого газодувкою 6, створювався киплячий шар, у якому, безпосередньо, і відбувався процес капсулювання.

Збоку продуктової камери, приблизно в середню по висоті частину шару, встановлена пневматична форсунка 4, до якої підведене стиснене повітря і рідка органіка, що являє собою суспензію – суміш рідини та дрібних органічних часток. Попередньо, до потрапляння у мірний бачок 5, вихідна органіка (курячий послід) проходить тонке подрібнення для отримання однорідної гомогенної маси. Стиснене повітря захоплює суспензію і розпилює її в шар гранул, утворюючи в ньому порожнину, куди і подається розпил. Таким чином, киплячий шар розділяється на дві зони: основна, де відбувається сушіння гранул, і зона зрошення, де гранули покриваються шаром плівкотвірної суспензії.

До верхньої частини продуктової камери, за допомогою фланцевого з'єднання, прикріплена кришка 3, діаметр якої приблизно удвічі більший за діаметр камери 1. Таке різке розширення поперечного перерізу апарата призводить до зменшення швидкості газового потоку, тобто простір всередині кришки є сепаративною зоною. Ці заходи забезпечують мінімізацію унесення крапель органічної суспензії відпрацьованим повітрям. Однак деякі краплі разом з повітрям все ж виносяться за межі апарату, а рідкий курячий послід має дуже специфічний і неприємний запах. Для вирішення цієї проблеми відпрацьоване повітря за допомогою з'єднувальної труби 9 направляється до лабораторного витяжного пристрою (на рис. 1 не показаний).

3. 2. Температурні режими капсулювання

Особливістю використання в якості матеріалу оболонки курячого посліду є нанесення на поверхню мінеральної гранули не розчину, а суспензії. Для забезпечення усталеного киплячого шару необхідно виконання умови рівноваги гранули ($\Sigma F=0$): тобто сила земного тяжіння гранули ($m \cdot g$) врівноважується силою, яку прикладає повітря до її поверхні (F_{Π}). А зміна маси шару частинок відбувається внаслідок введення органічної суспензії та її випаровування (рис. 2).

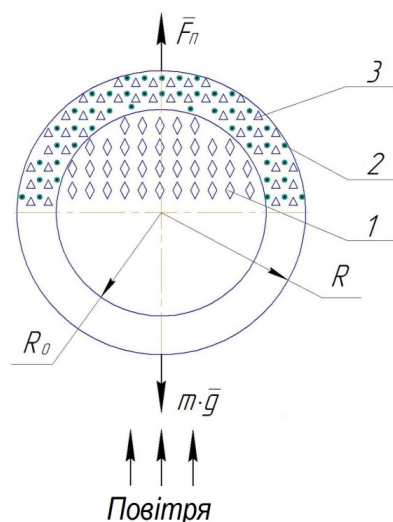


Рис. 2. Схема взаємодії мінеральної частинки, покритої органічною суспензією, з повітрям:

1 – мінеральна речовина; 2 – волога; 3 – суха органічна речовина; R_0 , R – початковий і поточний радіуси частинки відповідно; F_{Π} – сила лобового опору; $m \cdot g$ – сила земного тяжіння

Найбільш вагомим фактором, що впливає на кінетику росту гранул, є характер взаємодії між краплями суспензії та мінеральними гранулами. Тобто швидкість дорощування гранул шаром органічної речовини залежить від сумірності двох факторів: часу розтікання краплі та інтенсивності тепло-масообміну (інтенсивності видалення рідкої фази суспензії).

При дуже швидкому підводі тепла рідина випаровується з краплі, яка ще не встигла досягти гранули. По мірі зменшення кількості тепла крапля потрапляє і розтікається по все більшій мінеральній поверхні, доки не покриє всю гранулу. При нестачі тепла для випаровування органічної краплі гранула залишається вологою, а це супроводжується тим, що волога починає дифундувати через прикордонний шар всередину ядра.

Таким чином, механізм росту гранул неоднозначний і істотно залежить від специфіки суспензії та режиму процесу капсулювання, що визначають характер взаємодії диспергованої суспензії з дисперсною твердою фазою.

Дослідним шляхом визначено температурний інтервал (40 – 80 °С), коли відбувається зчеплення органічної речовини з мінеральною поверхнею. Це широкий діапазон, в якому були встановлені три характерні режими процесу капсулювання [10]:

1) при температурі шару в межах 40 – 50 °С крапля суспензії не розтікається по поверхні гранули, а закріплюється з однієї сторони гранули, утворюючи при висиханні міцний наріст, який за своїми розмірами відповідає розмірам краплі (рис. 3, а);

2) при підвищенні температури шару до 60 – 65 °С крапля суспензії розтікається по мінеральній поверхні гранули і починає інтенсивно випаровуватися рідина, утворюючи при висиханні тонкий міцний шар сухої органіки (рис. 3, б);

3) подальше підвищення температури шару (70 – 80 °С) призводить до утворення нерівномірної поверхні з глибокими тріщинами – це супроводжується сколюванням органічної речовини в окремих місцях гранули, утворюючи при цьому нові органічні ядра (рис. 3, в).

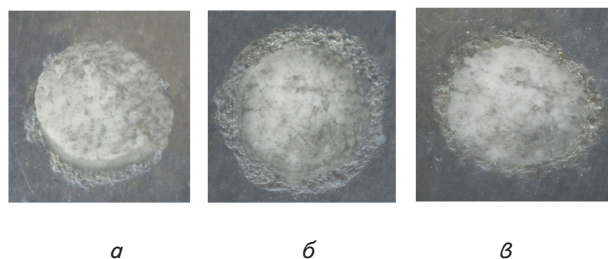


Рис. 3. Зрізи гранул карбаміду, капсульованих курячим послідом ($\times 20$), при відповідному температурному режимі: а – 40–50 °С; б – 60–65 °С; в – 70–80 °С

Для процесу капсулювання гранул карбаміду суспензією курячого посліду робочим є температурний режим 60 – 65 °С, який сприяє повному залученню мінеральних ядер в шар органічної речовини, тобто дозволяє всі гранули доростити до товарного розміру. Структура отриманих в такий спосіб двошарових органо-мінеральних гранул зображена на рис. 4.

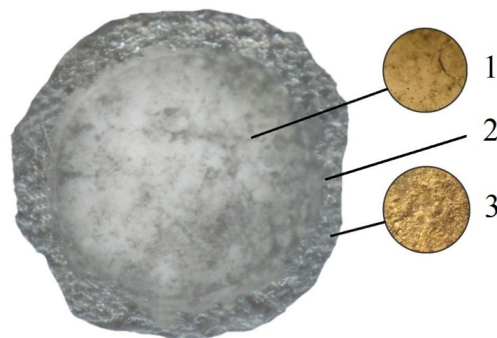


Рис. 4. Структура органо-мінеральних гранул: 1 – мінеральне ядро (карбамід); 2 – перехідна зона; 3 – суха органічна оболонка (курячий послід)

3. 3. Математична модель процесу

У киплячому шарі виокремимо елементарний об'єм ΔV , в якому частина гранул приходить із сусідніх елементарних комірок, а деякі гранули залишають цей об'єм. Характеристикою цього є функція ймовірності виходу частинок з виділеного об'єму $\theta_{i+1}(\tau)$.

Із усієї сукупності гранул в нижню комірку перейдуть частинки, розмір яких є більшим за деякий критичний, а ті гранули, розмір яких менше критичного, будуть продовжувати укрупнюватись в цьому шарі або перейдуть у вищезрештовані комірки за рахунок їх винесення газовим потоком. Таким чином, у псевдозрідженому шарі має місце процес пневмокласифікації, який полягає в тому, що відбувається розшарування гранул за розміром: знизу зосереджуються великі гранули, вище – гранули меншого розміру, а зверху киплячого шару – дрібні гранули.

Якщо процес переносу матеріальних потоків розглядати в умовах, які безперервно змінюються у часі та просторі, то рівняння матеріального балансу в виділеному елементарному об'ємі запишеться у наступному вигляді:

$$\frac{\partial M_i(\tau)}{\partial \tau} \int_0^\infty f(D, \tau) dD = M_{i-1}(\tau) \int_0^\infty f(D, \tau) dD - M_{i+1}(\tau) \cdot \theta_{i+1}(\tau) \int_0^\infty f(D, \tau) dD, \quad (1)$$

де $f(D, \tau)$ – функція розподілу гранул за розмірами; M_{i-1} , M_i , M_{i+1} – маса гранул у відповідному елементарному об'ємі шару, кг; D – діаметр гранул, м; τ – час проведення процесу, с.

Функція розподілу (щільність розподілу) гранул за розмірами характеризує частку гранул розміром від D до $D+dD$ у довільний момент часу. Тобто, функція $f(D, \tau)$ змінюється в часі на кожному кроці траєкторії руху часток і нормується до одиниці:

$$\int_0^\infty f(D, \tau) dD = 1. \quad (2)$$

Розглянемо збільшення маси шару органічної оболонки на поверхні сферичної частинки в момент часу від τ_0 до τ . При цьому розміри частинок змінюються від R_0 до R відповідно ($R_0 < R$). За встановленим алгоритмом [8] отримуємо рівняння для визначення швидкості росту часток в псевдозрідженому шарі:

$$v = \frac{k \cdot R_0 \cdot g_0 \cdot \rho_{ГР}}{3 \cdot \rho_C \cdot \sqrt[3]{\left(g_0 \cdot \frac{\rho_{ГР}}{\rho_C} \cdot \tau + 1\right)^2}}, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, що враховує втрати органічної суспензії (у випадку капсулювання курячим послідом $k=0,95$ [8]); g_0 – питома витрата матеріалу оболонки, c^{-1} ; $\rho_{ГР}$ – щільність матеріалу вихідних гранул, $кг/м^3$; ρ_C – густина органічної суспензії, $кг/м^3$.

4. Апробація результатів досліджень

Результати експериментальних досліджень дорошування полідисперсного шару мінеральних гранул органічною оболонкою приведені на рис. 5.

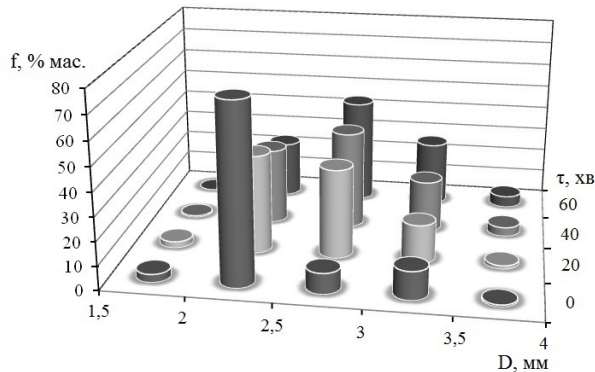


Рис. 5. Гістограми розподілу частинок (f) за розмірами (D) в різні моменти часу (τ) протягом процесу капсулювання

Аналітично результати експериментів найкраще описує функція виду:

$$f = \exp(a \cdot D^2 + b), \quad (4)$$

де a і b – параметри функції, що залежать від часу проведення процесу.

Значення середньозваженого діаметра в певний момент часу розраховується за рівнянням:

$$D = D_0 + 2 \cdot v \cdot \tau. \quad (5)$$

У нашому випадку інтенсивність подачі суспензії незмінна, тобто $g_0 = \text{const}$. За таких умов, залежність швидкості росту часток від часу проведення процесу $v(\tau)$ має спадаючий характер, тому при розрахунках слід використовувати усереднені значення швидкості росту.

Результати теоретичних розрахунків за формулою (5) і експериментальних досліджень приведені на рис. 6.

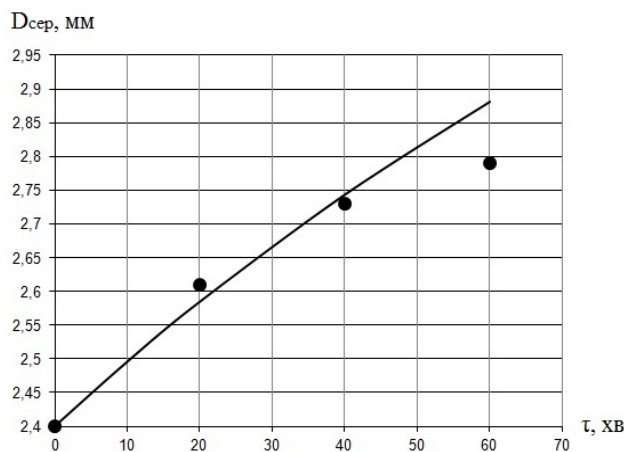


Рис. 6. Порівняння теоретичних (лінія) та експериментальних (точки) значень змінення середньозваженого діаметра ($D_{ср}$) в залежності від часу проведення процесу (τ) при питомій витраті суспензії $g_0 = 1,86 \cdot 10^{-4} c^{-1}$

Як це видно з рис. 6, експериментальні значення задовільно співпадають з теоретичними (максимальна відносна похибка складає 3,2 %). Таким чином, для

наближеного прогнозування змінення усередненого діаметра часток під час капсулювання в псевдозрідженому шарі можна використовувати рівняння (5).

5. Висновки

1. Показана перспективність використання в якості матеріалу оболонки суспензії курячого посліду, в результаті чого: по-перше, запобігається його потрапляння в необробленому вигляді в оточуюче середовище, а по-друге, завдяки органічному походженню матеріалу не забруднюється ґрунт.

2. Встановлено вплив на механізм росту гранул часу розтікання крапель суспензії та інтенсивності видалення рідкої фази суспензії.

3. Експериментально встановлені характерні температурні режими процесу капсулювання гранул карбаміду суспензією курячого посліду, визначено оптимальний (робочий) режим, а саме: при температурі 60–65 °С на поверхні мінеральної гранули утворюється суцільний міцний шар сухої органіки.

4. Приведені залежності для аналітичного розрахунку процесу дорощування мінеральних гранул органічною оболонкою, а також результати порівняння з експериментальними дослідженнями, які показали, що розроблена математична модель може бути застосована для теоретичного розрахунку процесу капсулювання у киплячому шарі.

Література

- Jarchow, M. E. Nitrogen fertilization increases diversity and productivity of prairie communities used for bioenergy [Text] / M. E. Jarchow, M. Liebman // *GCB Bioenergy*. – 2013. – Vol. 5. – P. 281–289.
- Galichechi, S. Nitrogen fertilizer the effects on growing potato [Text] / S. Galichechi, M. Gashti azar // *Journal of Biology and today's world*. – 2013. – Vol. 2. – P. 335–338.
- Pare, M. C. Physical properties of organo-mineral fertilizers – Short Communication [Text] / M. C. Pare, S. E. Allaire, L. Khiari, C. Nduwamungu // *Canadian Biosystems Engineering*. – 2009. – Vol. 51. – P. 3.21–3.27.
- Мартиненко, В. М. Органічні добрива в землеробстві Сумщини [Текст] / В. М. Мартиненко, В. В. Голоха, В. П. Іванов. – Суми: Мрія, 2006. – 23 с.
- Khiari, L. Phosphorus transformations in acid light-textured soils treated with dry swine manure [Text] / L. Khiari, L.-E. Parent // *Canadian Journal of Soil Science*. – 2005. – Vol. 85. – P. 75–87.
- Szeremeta, A. Organic farming policy in Poland [Text] : матер. XII міжн. наук. конф. / A. Szeremeta // *Економіка для екології*. – Суми: СумДУ, 2006. – С. 143–149.
- Ostroha, R. Mechanism of film formation during granules capsulation in fluidized bed [Text] : матер. III міжн. конф. / R. Ostroha, M. Yukhymenko // *Хімія та хімічні технології. ССТ-2013*. – Національний університет «Львівська політехніка», 2013. – С. 148–149.
- Острога, Р. О. Кінетика капсулювання гранульованих мінеральних добрив органічною оболонкою [Текст] / Р. О. Острога // *Вісник Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2014. – № 7 (1050). – С. 146–151.
- Kornienko, Y. Mathematical modeling of continuous formation of multilayer humic-mineral solid composites [Text] / Y. Kornienko, R. Sachok, V. Rayda, O. Tsepka // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2009. – Vol. 4. – P. 335–338.
- Острога, Р. О. Режимні параметри процесу капсулювання мінеральних добрив органічною оболонкою [Текст] / Р. О. Острога, М. П. Юхименко // *Вісник Сумського державного університету*. – 2013. – № 1. – С. 56–60.