

УДК 631.812, 504.062:574

**ТЕПЛОМАСООБМІН ПРОЦЕСУ КАПСУЛЮВАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ
ВОДНИМ РОЗЧИНОМ ПЛІВКОУТВОРЮЮЧОЇ КОМПОЗИЦІЇ ПАЛИГОРСЬКИТ–МЕЛЯСА****М. С. Мальований, О. А. Нагурський**

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна. E-mail: mmal@polynet.lviv.ua; nahurskyy@mail.ru

В. Я. Бунько

ВП НУБіП України "Бережанський агротехнічний інститут"

вул. Академічна, 20, м. Бережани, Тернопільська обл., 47501, Україна. E-mail: VBunko@gmail.com

В. М. Друзюк

Управління магістральних газопроводів «Львівтрансгаз»

вул. Рубчака, 3, м. Львів, 79026, Україна. E-mail: vdruzuk@mail.ru

Досліджено особливості тепломасообміну процесу капсулювання мінеральних добрив в псевдозрідженому шарі. Проведений теоретичний аналіз матеріального та теплового балансу процесу. Розроблено математичну модель розрахунку кінетичних параметрів капсулювання гранул добрива водними розчинами плівкоутворюючих композицій в апараті псевдозрідженого шару. Проведена серія експериментальних досліджень процесу капсулювання на дослідній установці. Експериментальним шляхом визначено коефіцієнт тепловіддачі до поверхні гранульованої нітроамфоски та коефіцієнт масовіддачі водяної пари від поверхні частинок у псевдозріджуюче повітря в процесі капсулювання водним розчином суміші палигорськіт–меляса із масовим співвідношенням 5:4.

Ключові слова: капсулювання добрив, меляса, палигорськіт, теплообмін, масообмін.**ТЕПЛОМАСООБМЕН ПРОЦЕССА КАПСУЛИРОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ
ВОДНЫМ РАСТВОРОМ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩЕЙ КОМПОЗИЦИИ ПАЛИГОРСЬКИТ–МЕЛЯССА****М. С. Малеваний, А. А. Нагурский**

Национальный университет «Львовская политехника»

ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, 79013, Украина. E-mail: mmal@polynet.lviv.ua; nahurskyy@mail.ru

В. Я. Бунько

ПП НУСиП Украины "Бережанский агротехнический институт"

ул. Академическая, 20, г. Бережаны, Тернопольская обл., 47501, Украина. E-mail: VBunko@gmail.com

В. М. Друзюк

Управление магистральных газопроводов «Львовтрансгаз»

ул. Рубчака, 3, г. Львов, 79026, Украина. E-mail: vdruzuk@mail.ru

Исследованы особенности тепломассообмена процесса капсулирования минеральных удобрений в псевдооживленном слое. Проведен теоретический анализ материального и теплового баланса процесса. Разработана математическая модель расчета кинетических параметров капсулирования гранул удобрения водными растворами пленкообразующих композиций в аппарате псевдооживленного слоя. Проведена серия экспериментальных исследований процесса капсулирования на опытной установке. Экспериментальным путем определены коэффициент теплоотдачи к поверхности гранулированной нитроамфоски и коэффициент массоотдачи водяного пара от поверхности частиц в псевдооживляющий воздух в процессе капсулирования водным раствором смеси палигорскит–мелясса с массовым соотношением 5:4.

Ключевые слова: капсулирование удобрений, меласса, палигорськіт, теплообмен, масообмен.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. У міру розвитку агропромислового виробництва з метою забезпечення людства продуктами харчування все частіше постає проблема забезпечення збалансованого природокористування: з однієї сторони для досягнення високих врожаїв якісної сільськогосподарської продукції необхідне внесення певного набору добрив та пестицидів, з іншої – складно попередити забруднення надлишковими кількостями цих речовин екоагросистеми.

На мінімізацію негативного впливу добрив та пестицидів на навколишнє природне середовище з одночасним досягненням необхідної норми забезпечення ними рослин направлені численні дослідження науковців всього світу.

У результаті їх досліджень розробляються та впроваджуються нові агротехнології, підходи у веденні агропромисловості, види агрохімікатів та способи їх внесення. Проте, не дивлячись на важливість наукової проблеми та величезну кількість дослі-

джень у напрямку її раціонального вирішення, питання забруднення агроєкосистем мінеральними добривами залишається актуальним й сьогодні.

Тому актуальним є і проведення досліджень з пошуку нових форм мінеральних добрив (капсульованого добрива пролонгованої дії), які б забезпечували мінімізацію втрат добрив, а отже й мінімізацію їх негативного впливу на агроєкосистему.

Необхідною умовою для створення капсули є її нешкідливість для агроєкосистеми, певні фізико-механічні властивості, ефективність в ракурсі пролонгованого вивільнення живильних речовин. В значній мірі якість отриманих капсульованих добрив визначається вибраною технологією капсулювання. На дослідження процесу капсулювання в псевдозрідженому шарі і спрямовані описані нижче дослідження.

Кінетика капсулювання дисперсних матеріалів в стані псевдозрідження визначається інтенсивністю

процесів, які відбуваються в процесі затвердіння оболонки на поверхні частинок і залежать від природи плівкоутворювача. Капсулювання розчином плівкоутворювача супроводжується тепло- та масообміном між твердими частинками, рідким плівкоутворювачем та псевдозріджуючим повітрям [1, 2].

У літературі приведені результати чисельних досліджень масообміну в стані псевдозрідження, на підставі яких зроблені висновки, що на інтенсивність цих процесів впливають такі параметри, як: швидкість повітря, розмір частинок, фізичні властивості речовин, висота шару, барботаж бульбашок [3, 4].

У досліджуваних системах частинка твердого матеріалу приймає участь у масообміні одноразово від моменту контакту із газовим середовищем і до встановлення динамічної рівноваги. У процесах капсулювання поверхня частинки відіграє роль носія рідкої фази, яка обмінюється масою із газовим середовищем. У процесі цього масообміну вміст рідини на частинці періодично поновлюється за рахунок постійного диспергування плівкоутворювача в шар матеріалу.

Для фізичної реалізації процесу капсулювання необхідно, щоб кількість розчинника, яка потрапляє на поверхню частинки, не перевищувала його кількості, яка видаляється з поверхні у газове середовище. Тому практичну зацікавленість становить встановлення кінетичних закономірностей процесу капсулювання гранульованих мінеральних добрив розробленою плівкоутворюючою композицією.

Метою роботи є дослідження особливостей тепломасообміну процесу капсулювання мінеральних добрив в псевдо зрідженому шарі.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Нами досліджувався тепломасообмін у процесі капсулювання гранульованої нітроамофоски композицією із дисперсного палигорського сорбенту Дашуківського родовища (природний сорбент) та меляси із співвідношенням компонентів 5:4 в апараті псевдозрідженого шару. Саме такий склад капсулоутворюючої композиції встановлений нами як оптимальний в ході попередніх досліджень [5].

Теплообмін в процесі капсулювання дисперсного матеріалу в псевдозрідженому шарі відрізняється від сушіння чи простого нагрівання (охолодження) наявністю на поверхні частинок розчину плівкоутворюючого матеріалу. В процесі капсулювання частина тепла витрачається на випаровування рідкого дисперсійного середовища (води) з поверхні матеріалу. Рівняння теплового балансу для процесу капсулювання в стаціонарних умовах можна записати наступним чином:

$$Q_{нов} = Q_{роз} + Q_{вин}, \quad (1)$$

де $Q_{нов}$ – тепло, яке приноситься в апарат з псевдозріджуючим агентом, Вт; $Q_{роз}$ – тепло, яке витрачається на нагрівання та випаровування рідкого дисперсійного середовища (води), Вт; $Q_{вин}$ – тепло, яке виноситься з апарату відпрацьованим псевдозріджуючим агентом, Вт.

Для теоретичного аналізу приймаємо, що робоча зона апарату ізольована і втрати тепла в навколишнє середовище відсутні. Виходячи з рівняння (1), кількість тепла, яка витрачається на нагрівання та випаровування рідкого дисперсійного середовища (води), буде дорівнювати:

$$Q_{роз} = Q_{нов} - Q_{вин} \quad (2)$$

Якщо вважати, що теплоємність газу залишається практично незмінною в робочому діапазоні температури, то рівняння (2) можемо записати у вигляді [6]:

$$Q_{роз} = G_{нов} C_{нов} (t_{вх} - t_{вих}), \quad (3)$$

де $t_{вх}$, $t_{вих}$ – температура псевдозріджуючого агента, відповідно, на вході і на виході робочої зони апарату, °С.

Кількість тепла, яка використовується на нагрівання та випаровування рідкого дисперсійного середовища (води), може бути визначена за допомогою системи рівнянь:

$$\begin{cases} Q_{нагр} = G_{роз} C_{роз} (t_{роз} - t_{np}) \\ Q_{вин} = G_{роз} r_{роз} \end{cases}, \quad (4)$$

де $G_{роз}$ – витрата рідкого дисперсійного середовища (води), кг/с; $C_{роз}$ – теплоємність рідкого дисперсійного середовища (води), Дж/кгК; $t_{роз}$ – температура плівкоутворюючої суспензії на поверхні частинок, °С; t_{np} – початкова температура плівкоутворюючої суспензії, °С; $r_{роз}$ – питома теплота пароутворення рідкого дисперсійного середовища (води), Дж/кг.

Приймаємо, що температура поверхні частинки, на якій формується оболонка приблизно дорівнює температурі плівкоутворюючої суспензії на ній.

Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні частинок дисперсного матеріалу можна визначити за рівнянням:

$$Q = a\bar{F}(\bar{t}_{нов} - t_ч), \quad (5)$$

де \bar{F} – середня площа теплообміну в процесі капсулювання, м²; $\bar{t}_{нов}$ – середня температура повітря в робочій зоні апарату, °С; a – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²К; $t_ч$ – температура поверхні частинки, °С.

Розмір частинки в процесі капсулювання змінюється на величину покриття, товщина якого зростає. Це призводить до збільшення площі поверхні частинки. В початковий момент часу площа частинки кулястої форми визначається за рівнянням:

$$F_o = \pi d_o^2, \quad (6)$$

де d_o – початковий діаметр частинки, м.

Маса плівки на поверхні частинки в будь-який момент часу t :

$$m_t = m_c t, \quad (7)$$

де m_c – масова витрата плівки, кг/с.

Виразимо об'єм плівки на поверхні частинки в будь-який момент часу через його геометричні розміри:

$$V_{пол}^t = \frac{m_t}{\rho_{пол}} = \pi d_o^2 (\Delta d) \quad (8)$$

де $\rho_{пол}$ – густина плівки, кг/м³; Δd – товщина плівки на поверхні частинки в будь-який момент часу, м.

Виразивши Δd із рівняння (8), отримаємо:

$$\Delta d = \frac{V_{пол}^t}{\pi d_o^2} = \frac{m_t}{\rho_{пол} \pi d_o^2} \quad (9)$$

Знаючи товщину плівки в будь-який момент часу, визначаємо загальний розмір частинки:

$$d_t = d_o + \Delta d \quad (10)$$

Тоді площа поверхні, відповідно, буде дорівнювати:

$$F_t = \pi d_t^2 \quad (11)$$

За умови повної теплоізоляції робочої зони апарату можемо прирівняти праві частини рівняння (3) і системи (4):

$$G_{нов} C_{нов} (t_{ex} - t_{вух}) = G_{роз} [C_{роз} (t_{роз} - t_{np}) + r_{роз}] \quad (12)$$

З рівняння (12) отримуємо залежність для розрахунку температури рідкого дисперсійного середовища (води) на поверхні частинки:

$$t_{роз} = \frac{G_{нов} C_{нов} (t_{ex} - t_{вух}) + G_{роз} (C_{роз} t_{np} - r_{роз})}{G_{роз} C_{роз}} \quad (13)$$

Рівняння (3), (5) і (13) утворюють систему, яка дозволяє розрахувати коефіцієнт тепловіддачі від псевдозріджуючого агента до поверхні частинок матеріалу, на якій формується покриття (плівка).

Створена палигорськітом на поверхні частинки дисперсного матеріалу плівка формується в процесі випаровування рідкого дисперсійного середовища (води) з плівкоутворюючої суспензії. Швидкість випаровування рідкого дисперсійного середовища (води) визначає інтенсивність подачі плівкоутворюючої суспензії в шар матеріалу, а, відповідно, і тривалість проведення процесу капсулювання.

Швидкість випаровування рідкого дисперсійного середовища (води) з поверхні частинки можна описати за кінетичним рівнянням [8]:

$$\frac{dM}{dt} = \beta F_t (r_{нас} - r) \quad (14)$$

де M – маса випареного рідкого дисперсійного середовища (води), кг; β – коефіцієнт масовіддачі пари рідкого дисперсійного середовища (води) від поверхні частинки в середовище псевдозріджуючого агента, $c_{нас}$ – густина пари рідкого дисперсійного середовища (води) в стані насичення за умов процесу, kg/m^3 ; c – дійсна густина рідкого дисперсійного середовища (води) в робочій зоні апарату, kg/m^3 .

Замінивши диференціали кінцевою різницею, з рівняння (14) визначаємо коефіцієнт масовіддачі:

$$b = \frac{\Delta M}{F_t \Delta t (r_{нас} - r)} \quad (15)$$

Визначивши значення β , можемо рішити зворотну задачу, визначити оптимальну витрату плівкоутворюючої суспензії, що дозволить за максимальної продуктивності процесу капсулювання отримувати матеріали заданих властивостей.

Для проведення експериментальних досліджень використовували гранульовану нітроамфоску промислового виробництва. Як плівкоутворююча композиція використовувалась суміш палигорськіту з мелясою буряковою із співвідношенням 5 : 4.

Експериментальні дослідження проводили в апараті псевдозрідженого шару циліндричного типу (рис. 1).

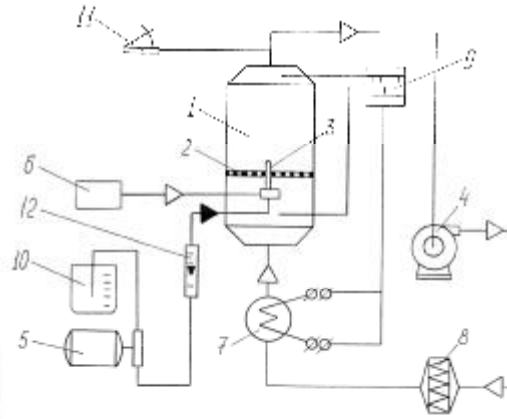


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки для нанесення покриття на тверді частинки кулястої форми: 1 – резервуар; 2 – газорозподільча решітка; 3 – форсунка; 4 – вентилятор; 5 – насос-дозатор; 6 – компресор; 7 – калорифер; 8 – фільтр; 9 – автоматична система управління температурним режимом; 10 – мірник; 11 – дифманометр; 12 – ротаметр.

Установка складається з резервуару (1) циліндричного типу, всередині якого вмонтовано газорозподільчу решітку (2) разом з пневматичною форсункою (3). Псевдозріджуюче повітря підігрівається в калорифері (7) і протягується через апарат вентилятором (4). Заданий температурний режим підтримується автоматичною системою (9). Витрата псевдозріджуючого повітря контролюється за допомогою дифманометра (11), під'єданого до трубки Піто. Плівкоутворююча композиція з мірника (10) насосом-дозатором (5) подається до розпилюючої форсунки (3). Контроль її витрати здійснюється ротаметром (12). Розпилення суспензії забезпечується стисненим повітрям, що поступає з компресора (6). Капсулювання твердих частинок проводили за робочої температури 50–60 °С, числі псевдозрідження 2,5–3,0 та інтенсивності зрошення $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. Робочу камеру апарату завантажували частинками загальною масою 0,4 кг, встановлювали необхідний температурний режим та здійснювали подачу плівкоутворюючої композиції насосом-дозатором до розпилюючої форсунки.

Для проведення експериментальних досліджень використовували водний розчин плівкоутворювача. Вміст водяної пари у відпрацьованому псевдозрідженному повітрі контролювали приладом, який визначав відносну вологість, що є співвідношенням дійсної густини пари до густини в стані насичення:

$$j = \frac{r}{r_{нас}} \quad (16)$$

Переписавши рівняння (15) з врахуванням (16), отримаємо:

$$b = \frac{\Delta M}{F_t \Delta t (1 - j) r_{нас}} \quad (17)$$

Для розрахунку кінетичних коефіцієнтів при проведенні експериментальних визначили параметри процесу капсулювання, приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри експериментальних досліджень процесу капсулювання

№	Параметри	Позначення	Числове значення		
1.	Витрата псевдозріджуючого агента, м ³ /с	V_c	11,4·10 ⁻³		
2.	Маса завантаженого матеріалу, кг	M_c	0,4		
3.	Початкова температура плівкоутворюючої суспензії, °С	t_{np}	14		
4.	Температура повітря на вході в робочу зону апарату, °С	t_{ex}	77	87	96
5.	Температура повітря на виході з робочої зони апарату, °С	$t_{вих}$	49	54	43
6.	Витрата плівкоутворюючої суспензії, м ³ /с · 10 ⁶	V_p	0,11	0,13	0,2
7.	Відносна вологість повітря на виході з апарату (при температурі в точці заміру), % (°С)	φ	14 (44)	10 (49)	26 (42)

Із використанням експериментальних результатів нами проводились розрахунки, використовуючи отримані нами приведені вище залежності. За рівняннями (3), (5) і (13) отримані значення коефіцієнту тепловіддачі від псевдозріджуючого агента до поверхні частинок матеріалу, на якій формується покриття: $\alpha = 164,8 \text{ Вт/м}^2\text{с}$. За рівнянням

(17) коефіцієнт масовіддачі пари рідкого дисперсійного середовища (води) від поверхні частинки в середовище псевдозріджуючого агента: $\beta = 5,67 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$.

ВИСНОВКИ. Досліджено тепло масообмін процесу капсулювання гранульованої нітроамоски в апараті псевдозрідженого шару. Розроблений алгоритм та математичний апарат розрахунку кінетичних параметрів процесу. Із використанням експериментальних даних отримані значення коефіцієнту тепловіддачі від псевдозріджуючого агента до поверхні частинок матеріалу, на якій формується покриття та коефіцієнт масовіддачі пари рідкого дисперсійного середовища (води) від поверхні частинки в середовище псевдозріджуючого агента.

ЛІТЕРАТУРА

1. Устянич Є. Теоретичні основи капсулювання дисперсних матеріалів. Навчальний посібник. – Львів: Академія друкарства, 2008. – 400 с.
2. Демчук І.А. Разработка технологий и моделирование процессов капсулирования твердых лекарственных форм в псевдооживленном слое: дис. к.т.н.: 05.17.08. – Львов, 1991. – 203 с.
3. Кунин Д., Левеншпиль О. Промышленное псевдооживление. / Пер. с англ., под ред. М.Г. Слинько и Г.С. Яблонского. – М: Химия, 1976. – 448 с.
4. Дэвидсон И., Харрисон Д. Псевдооживление / Пер. с англ. под ред. Н.И.Гельперина. – М: Химия, 1974. – 728 с.
5. Бунько В.Я., Нагурський О.А. Теоретичні основи застосування екологічно безпечних добрив пролонгованої дії, капсульованих плівкою на основі мелених мінералів та зв'язуючого органічного походження // 3-й всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю. – Вінниця, 2011. – С. 410–412.
6. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В двух книгах. – М.: Химия, 1981. – 812 с.

HEAT-AND-MASS TRANSFER OF MINERAL FERTILIZERS CAPSULATION WITH AQUEOUS SOLUTION OF THE Palygorskite-Molasses Film-Forming Composition

M. Malyvanyy, O. Nagurs'kiy

National University «Lvovskaya politechnica»

vul. S. Bandery, 12, L'viv, 79013, Ukraine. E-mail: mmal@polynet.lviv.ua; nahursky@mail.ru

V. Bun'ko

PP NUBiP of Ukraine "Berezhaniy agrotechnic institute"

vul. Akademichna, 20, Berezhani, Ternopol' region, 47501, Ukraine. E-mail: VBunko@gmail.com

V. Druzyk

Management of main gas pipelines «Lvovtransgaz»

vul. Rubchaka, 3, L'viv, 79026, Ukraine. E-mail: vdruzuk@mail.ru

In this work the peculiarities of heat- and mass- exchange during fertilizers encapsulation in the fluidized bed is studied in detail. The theoretical analysis of material and heat balance of the process is carried out. This work concerns with a mathematical model creation for calculation of kinetic parameters of the process of fertilizer encapsulation with aqueous solutions of film-forming components in the fluidized bed apparatus. The pilot experimental series of fertilizer encapsulation is performed. Heat-transfer coefficient of the surface of granular NPK fertilizer and mass-transfer coefficient of water air vapouring from the surface of the particles are experimentally estimated during the process of fertilizer encapsulation using aqueous mixture of palygorskite-molasses with mass ratio 5 : 4.

Key words: fertilizer encapsulation, molasses, palygorskite, heat transfer, mass transfer.

REFERENCES

1. Y. Ustyanych. *Theoretical basis of dispersed materials capsulation. Handbook.* – Lviv: Academy of Printing, 2008. – 400 p. [in Ukrainian]
2. I. Demchuk. *Development of the technology and process modelling of solid medicine form capsulation.* PhD thesis: 05.17.08. – Lviv, 1991. – 203 p. [in Russian]
3. D. Kunin, O. Levenshpyl. *Industrial fluidization.* USA, 1969 / Translation and auditing M. Slynko, H. Yablonsky Himiya, 1976. – 448 p. [in Russian]
4. J. Davidson, D. Harrison. *Fluidization / Translation and auditing N. Helperin.* – M: Himiya, 1974. – 728 p. [in Russian]

5. Theoretical basis of usage of ecologically safe fertilizers capsuled by milled minerals and binder of an organic origin / M. Malovanyy, V. Buno, O. Nahursky // *3-rd Ukrainian ecological fair.* – Vinnytsya, 2011. – PP. 410–412. [in Ukrainian]
6. N. Galperin. *Basic processes and apparatuses of chemical technology.* – M: Himiya, 1981. – 812 p. [in Russian]

Стаття надійшла 25.03.2012.

Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Бахаревим В.С.