

УДК 631.531.2:004.94

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.37-48>

Е.Б. Алієв, проф., д-р техн. наук, ст. досл, **Н.О. Пономаренко**, доц., канд. техн. наук, **Т.А. Рудь**

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail: aliev@meta.ua

Чисельне моделювання процесу дражування насіння у барабанному апараті

У статті наведено результати чисельного моделювання процесу дражування насіння у барабанному апараті з використанням програмного середовища Simcenter STAR-CCM+. Для опису руху насіння та нанесення поживної композиції застосовано поєднання методу дискретних елементів (DEM) і лагранжевого багатофазного підходу (LMP). Розроблена модель дозволила відтворити процес перемішування насіння, розпилення поживного розчину, осадження крапель на поверхню насіння та формування дражувальної оболонки. У ході дослідження оцінено вплив частоти обертання барабана, витрати дражувальної композиції, висоти шару насіння та кута нахилу лопатей на рівномірність покриття й продуктивність апарата. За результатами чисельного експерименту отримано регресійні залежності, що адекватно описують процес дражування насіння та дозволяють прогнозувати зміну критеріїв ефективності залежно від режимів роботи апарата. Встановлено, що найкращі показники якості дражування досягаються за частоти обертання барабана 14–15 об./хв., витрати дражувальної композиції 18–20 мл/хв., висоти шару насіння 0,22–0,26 м і кута нахилу лопатей 8–10°. За таких умов продуктивність процесу становить 50–52 кг/хв., нерівномірність формування дражувальної оболонки не перевищує 2,5–3,0 %, а енерговитрати зменшуються на 15–18 %. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів барабанних дражираторів та підвищення ефективності передпосівної підготовки насіння.

насіння, дражування, форсунка, пристрій, барабанний апарат, розпилення, розподіл, продуктивність, параметри, чисельне моделювання, метод дискретних елементів, Лагранжевий багатофазний підхід

Постановка проблеми. У сучасних технологіях вирощування сільськогосподарських культур одним із важливих напрямів підвищення польової схожості насіння, забезпечення дружності сходів та покращення початкового розвитку рослин є дражування насіння. Цей технологічний процес передбачає формування на поверхні насіння спеціальної оболонки, до складу якої можуть входити поживні речовини, мікроелементи, стимулятори росту, рідкі мінеральні добрива, засоби захисту рослин та інші біологічно активні компоненти. Завдяки цьому створюються сприятливі умови для проростання насіння, підвищується ефективність використання поживних речовин та забезпечується локалізоване їх надходження безпосередньо до зони розвитку кореневої системи [1, 2].

Особливої актуальності дражування набуває для дрібнонасінних культур, насіння яких характеризується малою масою, нерівномірною формою та недостатньою сипкістю. Формування дражувальної оболонки дозволяє покращити технологічні властивості насіння, підвищити точність висіву, зменшити витрати посівного матеріалу та створити умови для механізованого висівання сучасними високопродуктивними сівалками [3, 4].

Ефективність дражування визначається якістю сформованої оболонки, яка повинна відповідати ряду технологічних вимог. Насамперед покриття має бути

рівномірно розподіленим по всій поверхні насіння та характеризуватися однаковою товщиною шару. Важливими вимогами також є висока адгезія дражувальної композиції до поверхні насіння, достатня механічна міцність оболонки під час транспортування та висіву, відсутність тріщин і відшарувань, а також збереження здатності насіння до проростання. Крім того, процес дражування повинен забезпечувати мінімальні втрати поживних речовин та високу продуктивність обладнання.

Досягнення зазначених вимог значною мірою залежить від конструкції дражувального апарата та режимів його роботи. У барабанних апаратах якість формування оболонки визначається частотою обертання барабана, ступенем заповнення робочої камери, параметрами розпилення рідких компонентів, інтенсивністю перемішування насіння та тривалістю його перебування в зоні нанесення поживних речовин. Неправильний вибір цих параметрів може призводити до нерівномірного покриття насіння, утворення агрегатів, перевитрати дражувального матеріалу або механічного пошкодження насіннєвого матеріалу [7, 8].

Проведення натурних експериментів для визначення раціональних параметрів роботи дражувальних апаратів потребує значних матеріальних витрат і не дозволяє детально дослідити процес взаємодії насіння з рідкими компонентами всередині робочої камери. Тому перспективним напрямом є використання методів чисельного моделювання [9, 10], які дають можливість відтворити рух насіння, процес нанесення поживних речовин та формування дражувальної оболонки, а також обґрунтувати раціональні конструктивно-технологічні параметри барабанного апарата.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження процесу дражування насіння у барабанному апараті методами чисельного моделювання з метою забезпечення високої якості покриття насіння та підвищення ефективності технологічного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел свідчить, що для нанесення покривних матеріалів на насіння використовують декілька основних типів обладнання: тарілчасті (ротаційні) дражувальні апарати, барабанні дражиратори, відцентрові установки та апарати псевдозрідженого шару. Найбільшого поширення у промисловому насінництві набули барабанні та ротаційні апарати завдяки простоті конструкції, можливості обробки великих партій насіння та забезпеченню достатньо високої рівномірності покриття [7, 11, 12].

У роботах [7, 12] встановлено, що якість сформованої оболонки значною мірою залежить від умов розпилення рідкого компонента, положення форсунки, відстані між форсункою та шаром насіння, концентрації зв'язувальних речовин і режимів перемішування матеріалу. Дослідження ротаційних дражувальних апаратів показали, що зміна відстані розпилення та параметрів подачі зв'язувальної рідини суттєво впливає на міцність гранул, рівномірність покриття та схожість насіння [13, 14, 15].

Сучасні промислові дражувальні комплекси реалізують принцип пошарового формування оболонки з поетапним дозуванням рідких та порошкоподібних компонентів. При цьому барабанні установки забезпечують високу однорідність покриття насіння завдяки циклічному перемішуванню матеріалу та можливості багаторазового нанесення окремих шарів дражувальної композиції [16, 17]. Важливими перевагами таких систем є відтворюваність технологічного процесу, висока точність дозування та можливість автоматизованого керування параметрами обробки.

Останніми роками значна увага приділяється математичному та комп'ютерному моделюванню процесів дражування. Для дослідження руху насіння в робочій камері все ширше застосовується метод дискретних елементів (DEM), який дозволяє аналізувати кінематику окремих частинок, їх взаємодію між собою та зі стінками апарата. Одночасно для опису процесу розпилення рідких компонентів використовують CFD- та Lagrangian-

моделі, що дає можливість досліджувати траєкторії руху крапель, процес їх осадження на поверхню насіння та формування покриття. Поєднання методів DEM і CFD забезпечує детальне відтворення процесів дражування та відкриває можливість оптимізації конструктивних і режимних параметрів обладнання ще на етапі проектування [18, 19, 20].

Незважаючи на значну кількість досліджень, питання впливу конструктивних параметрів барабанних дражувальних апаратів та режимів їх роботи на процес нанесення поживних речовин залишаються недостатньо вивченими. Особливо це стосується визначення раціонального поєднання частоти обертання барабана, висоти шару насіння, параметрів розпилення рідких компонентів і геометрії внутрішніх робочих органів. Тому актуальним є проведення чисельного моделювання процесу дражування насіння у барабанному апараті з метою обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів та режимів роботи.

Постановка завдання. Метою дослідження є обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів та режимів роботи барабанного апарата для дражування насіння шляхом чисельного моделювання процесів руху насіннєвого матеріалу, нанесення поживної композиції та формування дражувальної оболонки з використанням поєднання методу дискретних елементів (DEM) і Лагранжевого багатофазного підходу (LMP).

Виклад основного матеріалу. Процес дражування насіння у барабанному апараті моделюється в програмному середовищі Simcenter STAR-CCM+ із використанням поєднання методу дискретних елементів (DEM) та лагранжевого багатофазного підходу (LMP). Метод DEM застосовується для моделювання руху та взаємодії окремих насінин у робочому об'ємі барабана, тоді як LMP використовується для опису процесу розпилення та перенесення крапель поживної композиції.

У розрахунковій моделі поживний розчин подається через форсунку у вигляді дрібнодисперсного факела всередину барабана, частково заповненого насінням. Обертання барабана забезпечує безперервне перемішування насіннєвої маси, багаторазові контакти насіння з краплями розчину та поступове формування дражувальної оболонки. Розрахункова область представлена замкненим об'ємом, утвореним корпусом барабана та внутрішніми робочими елементами, які забезпечують піднімання та пересипання насіння (рис. 1).

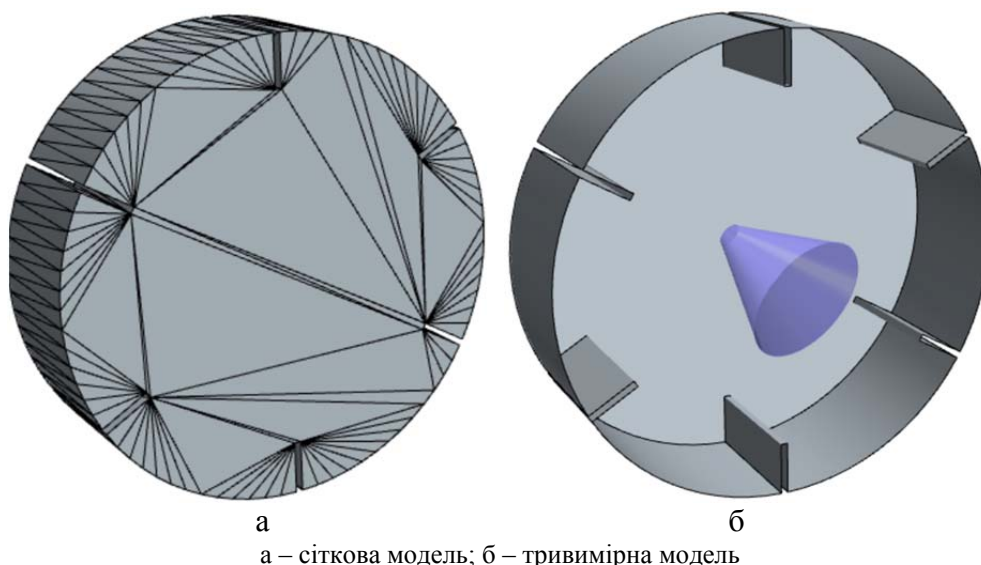


Рисунок 1 – Розрахункові моделі процесу дражування насіння у барабанному апараті

Джерело: розроблено авторами

Насіння моделюється у вигляді дискретних частинок із заданими геометричними та фізико-механічними характеристиками, а поживний розчин – у вигляді лагранжевих крапель із заданими параметрами розпилення. Осадження крапель на поверхню насіння описується механізмом адгезії та поглинання, а перерозподіл рідкої фази між окремими насінинами під час контактної взаємодії враховується за допомогою моделі перенесення рідкого компонента.

Для проведення чисельного моделювання було задано вихідні параметри, що характеризують геометричні властивості насіння, фізико-механічні характеристики частинок та параметри розпилення рідкої поживної композиції. Площа поверхні насінини визначалася як функція її радіуса та довжини і використовувалася для розрахунку товщини сформованого шару покриття. Насіння у моделі представлялося сферичними DEM-частинками довжиною радіусом 7 мм. Загальна кількість насінин у робочому об'ємі барабана становила 10000 частинок, що забезпечувало достатню репрезентативність процесу дражування. Для опису механічної взаємодії насінин між собою та зі стінками апарата коефіцієнт жорсткості частинок було прийнято на рівні 50000 Н/м. Під час математичних розрахунків використовувалася константа π . Подача рідкої дражувальної композиції здійснювалася через конічну форсунку. Висота факела розпилення становила 250 мм, що забезпечувало охоплення основної частини потоку насіння в робочій зоні барабана. Щільність крапель розпиленої рідини приймалася рівною 1200 кг/м³, що відповідає властивостям концентрованих поживних композицій. Витрата робочої рідини через форсунку становила 20 мл/хв, а початок розпилення задавався через 1,3 с після початку розрахунку, що дозволяло попередньо сформувати стабільний рух насіння в робочому об'ємі барабана.

Для опису контактної взаємодії між насінинами та зі стінками барабана використовувалася лінійна пружна модель (Linear Spring). Крім того, застосовувалася модель перенесення рідкої компоненти (Liquid Component Transfer), яка враховувала перерозподіл дражувальної композиції між насінинами під час їх контакту. Поєднання моделей DEM і LMP дало змогу відтворити рух насіння в барабані, процес осадження крапель поживного розчину на поверхню насінин та формування дражувальної оболонки, що дозволило дослідити вплив конструктивних і режимних параметрів апарата на якість дражування.

Застосування чисельного моделювання дає можливість дослідити вплив основних конструктивних і режимних параметрів барабанного апарата, зокрема частоти його обертання, ступеня заповнення робочої камери, параметрів розпилення поживної композиції та геометрії робочих органів, на якість формування дражувальної оболонки. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування раціональних параметрів процесу дражування насіння та вдосконалення конструкції барабанних апаратів.

Основними критеріями ефективності прийнято рівномірність нанесення дражувального покриття та продуктивність процесу. Рівномірність дражування характеризує ступінь однорідності розподілу поживної композиції по поверхні насіння і визначається відхиленням маси покриття окремих насінин від середнього значення:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2}}{\bar{m}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де m_i – маса дражувальної оболонки на i -ій насініні; $\bar{m}$ – середня маса дражувальної оболонки на насініні; N – кількість насінин у моделі. Чим менше значення цього показника, тим більш однорідною є сформована дражувальна оболонка.

Продуктивність визначали за масою насіння, що проходила через барабан за час моделювання, шляхом обліку кількості DEM-частинок у вихідній зоні апарата.

Для дослідження було обрано чотири основні фактори, які найбільше впливають на процес формування дражувальної оболонки. Першим фактором є частота обертання барабана (n_b), яка визначає інтенсивність перемішування насіння та тривалість його контакту з дражувальною композицією. Діапазон зміни параметра становив від 5 до 20 об/хв. Другим фактором є витрата дражувальної композиції (Q_p), що визначає кількість рідкої фази, яка подається в робочу зону апарата. Для досліджень було прийнято діапазон від 5 до 25 мл/хв. Третім фактором обрано висоту шару насіння у барабані (H_s), яка впливає на інтенсивність міжчастинкової взаємодії та рівномірність розподілу покриття. Дослідження проводилися в межах від 0,1 до 0,4 м. Четвертим фактором є кут нахилу лопатей барабана (θ), від якого залежить характер руху насіння та ефективність його перемішування. Значення цього параметра змінювалися в межах від 0 до 10° .

Для визначення впливу досліджуваних факторів використовувався повнофакторний план експерименту з трьома рівнями варіювання кожного параметра, що передбачало проведення 81 розрахункового досліджу.

У результаті чисельного моделювання процесу дражування насіння було отримано візуалізацію розподілу дражувальної композиції на поверхні насінин (рис. 2), а також карти швидкостей руху частинок і крапель усередині барабанного апарата (рис. 3).

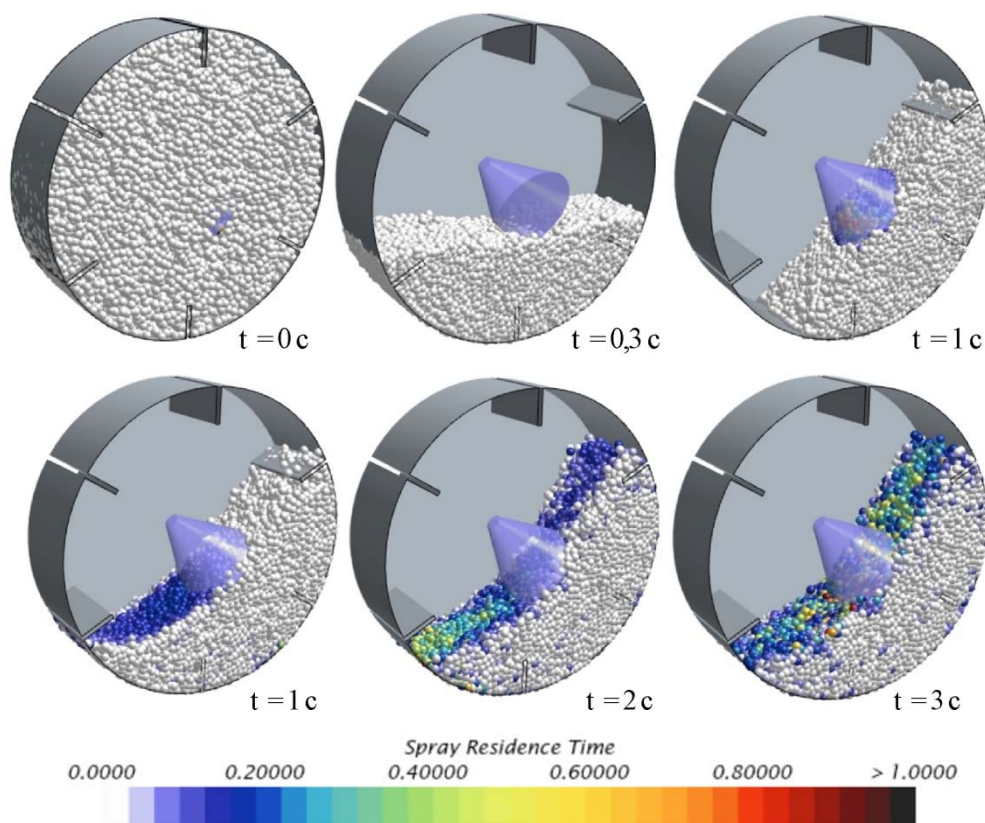


Рисунок 2 – Візуалізація результатів чисельного моделювання процесу дражування насіння у барабанному апараті

Джерело: розроблено авторами

Візуалізація результатів включала тривимірний розподіл товщини сформованого покриття на поверхні насіння, гістограми розподілу маси нанесеної композиції та анімацію процесу формування дражувальної оболонки в часі. Додатково було побудовано векторне поле швидкостей, яке відображало траєкторії руху насіння та напрямки переміщення крапель поживного розчину в робочій камері апарата.

Аналіз отриманих результатів показав, що в об'ємі барабана формується характерна циркуляційна структура руху насіння. Поблизу внутрішньої поверхні барабана спостерігаються зони інтенсивного переміщення частинок, тоді як у центральній частині формується область їх каскадного пересипання. Найбільш ефективне нанесення дражувальної композиції відбувається в місцях перетину факела розпилення з потоком піднятих частинок, де спостерігаються максимальні значення товщини покриття.

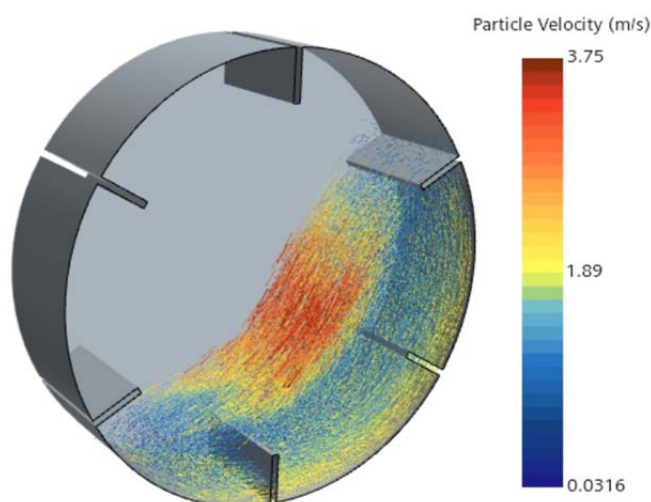


Рисунок 3 – Візуалізація векторного поля швидкостей у барабанному апараті

Джерело: розроблено авторами

Дослідження поля швидкостей дозволило встановити зв'язок між характером руху насіння та якістю формування оболонки. Після контакту з краплями поживного розчину на поверхні насіння утворюється тонкий рідкий шар, який у процесі подальшого перемішування та міжчастинкової взаємодії поступово перерозподіляється, забезпечуючи вирівнювання товщини покриття по всій масі насіння.

Водночас встановлено, що надмірне збільшення частоти обертання барабана або кута нахилу лопатей призводить до переходу частинок у центробіжний режим руху. У цьому випадку насіння притискається до стінок барабана, що зменшує кількість його контактів із факелом розпилення та погіршує рівномірність дражування.

За результатами чисельного моделювання та статистичної обробки отриманих даних було встановлено залежність рівномірності формування дражувальної оболонки від основних конструктивно-технологічних параметрів барабанного апарата (рис. 4):

$$U = 14,4962 + 33,5778N_s - 0,52748\ln_b + 0,302981Q_p - 0,381889\theta. \quad (2)$$

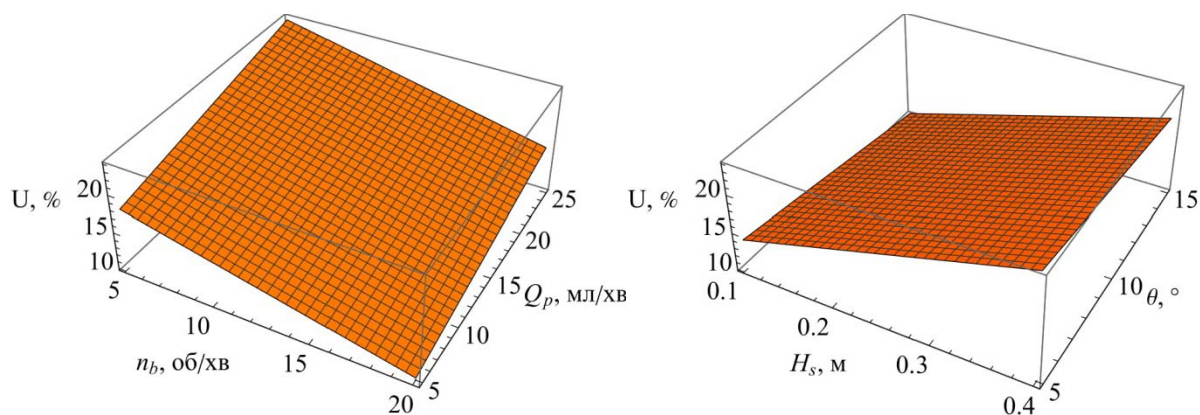


Рисунок 4 – Залежність рівномірності формування дражувальної оболонки від основних технологічних і конструктивних параметрів барабанного апарата

Джерело: розроблено авторами

Побудоване рівняння регресії другого порядку дозволило кількісно оцінити вплив частоти обертання барабана, витрати дражувальної композиції, висоти шару насіння та кута нахилу лопатей на якість покриття насіння. Отримана модель характеризувалася високим коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,87$), що підтверджує її адекватність та можливість використання для прогнозування параметрів процесу дражування.

Аналіз коефіцієнтів регресійного рівняння показав, що найбільший вплив на рівномірність нанесення поживної композиції має частота обертання барабана. При малих швидкостях насіння недостатньо перемішується, тоді як надмірне збільшення частоти обертання призводить до переходу частинок у відцентровий режим руху, за якого зменшується кількість їх контактів із факелом розпилення. Найбільш сприятливі умови для формування однорідної оболонки спостерігаються за середніх значень частоти обертання, коли забезпечується інтенсивне пересипання та багаторазова взаємодія насіння з краплями дражувальної композиції.

Витрата рідкої композиції також істотно впливає на якість покриття. За недостатньої подачі спостерігається неповне змочування поверхні насіння, тоді як надлишок рідини викликає утворення агломератів та локальне перенасичення поверхні. Найкращі результати досягаються в області середніх і підвищених значень витрати, коли забезпечується стабільне формування аерозольного факела та рівномірне осадження крапель на насіння.

Висота шару насіння в барабані визначає інтенсивність міжчастинкової взаємодії та процес перерозподілу рідкої фази. Зі збільшенням висоти шару зростає кількість контактів між насінинами, що сприяє вирівнюванню товщини покриття. Проте надмірне заповнення робочої камери може призводити до появи застійних зон та погіршення доступу дражувальної композиції до окремих ділянок шару.

Кут нахилу лопатей впливає на характер руху насіння в барабані. Невеликі кути забезпечують багаторазове перекошування частинок та їх ефективне перемішування, тоді як збільшення кута інтенсифікує осьове транспортування насіння і скорочує час його перебування в зоні розпилення. Унаслідок цього рівномірність покриття поступово знижується.

У результаті аналізу встановлено, що найкращі показники якості дражування досягаються за низьких і середніх значень частоти обертання барабана, підвищеної

витрати дражувальної композиції, значної висоти шару насіння та невеликих кутів нахилу лопатей. За таких умов забезпечується найбільш повна взаємодія насіння з факелом розпилення та рівномірне формування поживної оболонки.

Аналогічно було досліджено вплив зазначених факторів на продуктивність барабанного апарата (рис. 5):

$$P = 12,92 - 25,97H_s + 11,1934H_s^2 + 1,34642n_b - 0,4024H_s n_b + 0,2719Q_p - 0,087037H_s Q_p + 0,00585185n_b Q_p - 0,00153704Q_p^2 + 1,86037\theta - 0,0861\theta^2 \quad (3)$$

Отримане рівняння регресії другого порядку характеризувалося високим значенням коефіцієнта детермінації ($R^2 = 0,89$), що свідчить про високу точність опису процесу. Найбільший позитивний вплив на продуктивність має частота обертання барабана, оскільки зі збільшенням швидкості інтенсифікується переміщення насіння та його транспортування через робочу камеру.

Підвищення витрати дражувальної композиції також сприяє зростанню продуктивності завдяки покращенню умов формування покриття. Водночас надлишкова кількість рідини може викликати злипання насіння та зменшення рухливості шару, що негативно впливає на пропускну здатність апарата.

На відміну від інших факторів, збільшення висоти шару насіння призводить до зниження продуктивності через погіршення циркуляції частинок та виникнення зон уповільненого руху. Вплив кута нахилу лопатей має екстремальний характер: зі збільшенням кута продуктивність зростає до певного оптимального значення, після чого починає зменшуватися через надмірне прискорення осевого переміщення насіння.

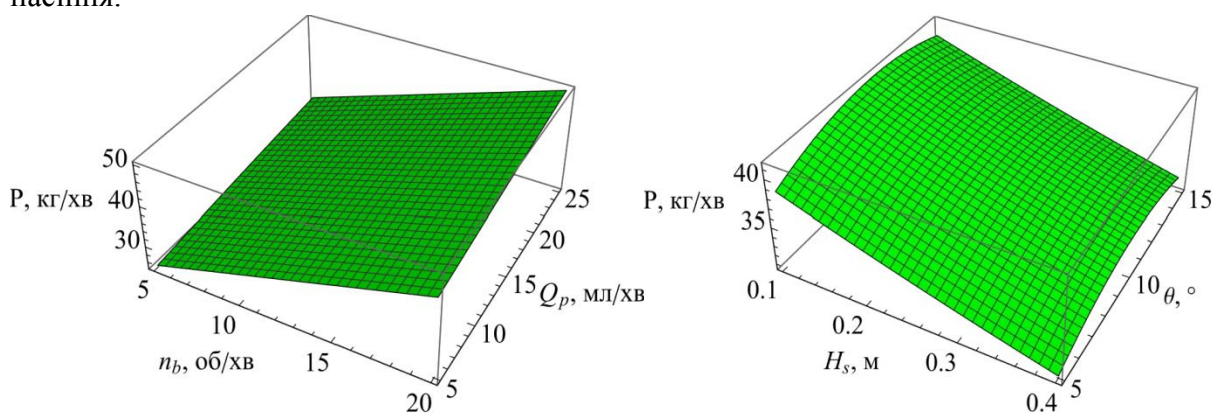


Рисунок 5 – Залежність продуктивності барабанного дражиратора насіння від основних технологічних і конструктивних параметрів

Джерело: розроблено авторами

Проведені дослідження показали, що максимальна продуктивність досягається за високої частоти обертання барабана, підвищеної витрати дражувальної композиції, невеликої висоти шару насіння та оптимального кута нахилу лопатей. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування конструктивних параметрів барабанного дражиратора та вибору раціональних режимів його роботи з метою забезпечення високої якості покриття насіння при максимальній продуктивності процесу.

Результати багатокритеріальної оптимізації засвідчили, що якість процесу дражування насіння та продуктивність барабанного апарата залежать від раціонального

поєднання частоти обертання барабана, витрати дражувальної композиції, висоти шару насіння та кута нахилу лопатей. У ході досліджень встановлено оптимальний діапазон параметрів: частота обертання барабана становить 14–15 об./хв., витрата дражувальної композиції – 18–20 мл/хв, висота шару насіння – 0,22–0,26 м, а кут нахилу лопатей – 8–10°. За таких режимів забезпечується продуктивність процесу на рівні 50–52 кг/хв., нерівномірність формування дражувальної оболонки не перевищує 2,5–3,0 %, а енерговитрати зменшуються на 15–18 % порівняно з режимами інтенсивного обертання барабана. Отримані результати підтверджують, що запропоновані параметри забезпечують оптимальне співвідношення між інтенсивністю перемішування насіння, рівномірністю нанесення дражувальної композиції та енергоефективністю процесу, що створює передумови для ефективного використання барабанних апаратів у промислових технологіях дражування насіння.

Висновки. Розроблено чисельну модель процесу дражування насіння у барабанному апараті в середовищі Simcenter STAR-CCM+, яка поєднує метод дискретних елементів (DEM) для моделювання руху насіння та Лагранжевий багатофазний підхід (LMP) для опису процесів розпилення, осадження і перенесення дражувальної композиції.

Встановлено, що характер руху насіння у барабані суттєво впливає на рівномірність формування дражувальної оболонки. Найбільш ефективно нанесення поживної композиції відбувається в зоні взаємодії факела розпилення з потоком піднятих і пересипаних частинок, де забезпечуються багаторазові контакти насіння з краплями розчину.

Отримано регресійні залежності, які описують вплив частоти обертання барабана, витрати дражувальної композиції, висоти шару насіння та кута нахилу лопатей на рівномірність формування оболонки і продуктивність процесу. Високі значення коефіцієнтів детермінації ($R^2 = 0,87$ та $R^2 = 0,89$) підтверджують адекватність розроблених математичних моделей.

Встановлено, що підвищення частоти обертання барабана сприяє зростанню продуктивності, однак за надмірних значень призводить до переходу частинок у відцентровий режим руху та погіршення рівномірності покриття. Витрата дражувальної композиції та висота шару насіння визначають інтенсивність міжчастинкової взаємодії і ступінь вирівнювання товщини сформованої оболонки.

За результатами багатокритеріальної оптимізації визначено раціональні параметри роботи барабанного апарата: частота обертання барабана 14–15 об./хв., витрата дражувальної композиції 18–20 мл/хв., висота шару насіння 0,22–0,26 м та кут нахилу лопатей 8–10°. За цих умов забезпечується продуктивність 50–52 кг/хв, нерівномірність дражування не перевищує 2,5–3,0 %, а енерговитрати знижуються на 15–18 %.

Отримані результати можуть бути використані під час проєктування та вдосконалення барабанних апаратів для дражування насіння, а також для обґрунтування раціональних режимів їх роботи з метою підвищення якості передпосівної підготовки насіннєвого матеріалу.

Список літератури

1. Afzal I., Javed T., Amirkhani M., Taylor A. G. Modern seed technology: Seed coating delivery systems for enhancing seed and crop performance. *Agriculture*. 2020. Vol. 10 (11). 526. DOI: 10.3390/agriculture10110526
2. Javed T., Afzal I., Shabbir R., Ikram K., Zaheer M. S., Faheem M., Ali H. H., Iqbal J. Seed coating technology: An innovative and sustainable approach for improving seed quality and crop performance. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2022. Vol. 21 (8). P. 536–545. DOI: 10.1016/j.jssas.2022.03.003
3. Biswal B. C., Mishra S., Jaiswal K., Mohanty S., Dash D. Seed coating innovations for sustainable horticulture enhancing germination, crop resilience and resource efficiency. *Discover Sustainability*. 2026. Vol. 7. 426. DOI: 10.1007/s43621-026-02826-5
4. Farooq M., Wahid A., Siddique K. H. M. Micronutrient application through seed treatments: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2012. Vol. 12 (1). P. 125–142. DOI: 10.4067/S0718-95162012000100011
5. Rocha I., Ma Y., Souza-Alonso P., Vosátka M., Freitas H., Oliveira R. S. Seed coating: A tool for delivering beneficial microbes to agricultural crops. *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. 1357. DOI: 10.3389/fpls.2019.01357
6. Bozdar B., Ahmed N., Meghwar M. R., Zhu Z., Talpur A., Li Z. H. Seed pelleting technologies: Paving the way for resilient and sustainable future farming. *Food and Energy Security*. 2026. Vol. 15 (1). e70193. DOI: 10.1002/fes3.70193
7. Pasha M., Hare C., Ghadiri M., Gunadi A., Piccione P. M. Inter-particle coating variability in a rotary batch seed coater. *Chemical Engineering Research and Design*. 2017. Vol. 120. P. 92–101.
8. Zhao T., Zhang H., Sun W., Zhang L. Numerical simulation and experimental study of a pelletizing coating machine for *Astragalus membranaceus* seeds. *Agriculture*. 2026. Vol. 16 (9). 955. DOI: 10.3390/agriculture16090955
9. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва : підручник. Київ : Аграрна наука, 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9
10. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання механізованих процесів агропромислового виробництва : монографія. Дніпро : ЛІРА, 2026. 220 с.
11. Pasha M., Ghadiri M., Gunadi A., Piccione P. M. Distinct element analysis of inter-particle coating variability in a batch seed coater. *EPJ Web of Conferences*. 2017. Vol. 140. Article 15035. DOI: 10.1051/epjconf/201714015035
12. Teunou E., Poncelet D. Batch and continuous fluid bed coating: Review and state of the art. *Journal of Food Engineering*. 2002. Vol. 53 (4). P. 325–340.
13. Sukhanova M., Mudarisov S., Zabrodin V., Bondarev A., Gallyamov F. Analysis of the interaction of seeds with a centrifugal disk working body of a chamber-type treater. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. 5420. DOI: 10.1038/s41598-022-09204-x
14. Вечера О. М., Теслюк Б. В., Куянов В. В. Підвищення якості протруювання насіння с.-г. культур з модифікованим вібраційним бункером. *Крамаровські читання : збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди 118-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906–1987)*. Київ, 2025. С. 311–313.
15. Вечера О. М., Куянов В. В. Підвищення якості протруювання насіння сільськогосподарських культур за допомогою комбінованої обробки. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2021. Vol. 12 (4). P. 109–115. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.04>
16. Вечера О. М., Куянов В. В. Вдосконалення інерційно-фрикційного протруювача насіння. *Аграрна енергетика в XXI сторіччі: досягнення і перспективи розвитку : збірник тез доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції*. 14 листопада 2023 р.
17. Вечера О. М., Куянов В. В. Технологія озонування для протруювання насіння. *Сучасні проблеми землеробської механіки : збірник тез доповідей XXIV Міжнародної наукової конференції*. Київ, 2023. С. 144–146.
18. Grohn P., Lawall M., Oesau T., Heinrich S., Antonyuk S. CFD-DEM simulation of a coating process in a fluidized bed rotor granulator. *Processes*. 2020. Vol. 8 (9). 1090. DOI: 10.3390/pr8091090
19. Song Y., Zhou T., Bai R., Zhang M., Yang H. Review of CFD-DEM modeling of wet fluidized bed granulation and coating processes. *Processes*. 2023. Vol. 11 (2). 382. DOI: 10.3390/pr11020382

20. Liu H., Ma X., Hou Z., Chen L., Tan A., Liu Y. Simulation and experimental study on the optimization of operating parameters for coating pellets of *Agropyron* seeds. *Agriculture*. 2025. Vol. 15 (19). 2017. DOI: 10.3390/agriculture15192017
21. Pasha M., Hare C., Ghadiri M., Gunadi A., Piccione P. M. Effect of particle shape on flow in discrete element method simulation of a rotary batch seed coater. *Powder Technology*. 2016. Vol. 296. P. 29–36. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.10.055

References

1. Afzal, I., Javed, T., Amirkhani, M., & Taylor, A. G. (2020). Modern seed technology: Seed coating delivery systems for enhancing seed and crop performance. *Agriculture*, 10 (11), 526. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10110526>
2. Javed, T., Afzal, I., Shabbir, R., Ikram, K., Zaheer, M. S., Faheem, M., Ali, H. H., & Iqbal, J. (2022). Seed coating technology: An innovative and sustainable approach for improving seed quality and crop performance. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21 (8), 536–545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2022.03.003>
3. Biswal, B. C., Mishra, S., Jaiswal, K., Mohanty, S., & Dash, D. (2026). Seed coating innovations for sustainable horticulture enhancing germination, crop resilience and resource efficiency. *Discover Sustainability*, 7, 426. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43621-026-02826-5>
4. Farooq, M., Wahid, A., & Siddique, K. H. M. (2012). Micronutrient application through seed treatments: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12 (1), 125–142. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012000100011>
5. Rocha, I., Ma, Y., Souza-Alonso, P., Vosátka, M., Freitas, H., & Oliveira, R. S. (2019). Seed coating: A tool for delivering beneficial microbes to agricultural crops. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1357. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01357>
6. Bozdar, B., Ahmed, N., Meghwar, M. R., Zhu, Z., Talpur, A., & Li, Z. H. (2026). Seed pelleting technologies: Paving the way for resilient and sustainable future farming. *Food and Energy Security*, 15 (1), e70193. DOI: <https://doi.org/10.1002/fes3.70193>
7. Pasha, M., Hare, C., Ghadiri, M., Gunadi, A. & Piccione, P. M. (2017). Inter-particle coating variability in a rotary batch seed coater. *Chemical Engineering Research and Design*, 120, 92–101.
8. Zhao, T., Zhang, H., Sun, W., & Zhang, L. (2026). Numerical simulation and experimental study of a pelletizing coating machine for *Astragalus membranaceus* seeds. *Agriculture*, 16 (9), 955. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture16090955>
9. Aliiev, E. B. (2023). *Numerical modeling of agro-industrial production processes*. Kyiv: Ahrarna nauka. DOI: <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9> [in Ukrainian]
10. Aliiev, E. B. (2026). *Numerical modeling of mechanized processes of agro-industrial production*. Dnipro : LIRA [in Ukrainian]
11. Pasha, M., Ghadiri, M., Gunadi, A., & Piccione, P. M. (2017). Distinct element analysis of inter-particle coating variability in a batch seed coater. *EPJ Web of Conferences*, 140, Article 15035. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714015035>
12. Teunou, E., & Poncelet, D. (2002). Batch and continuous fluid bed coating: Review and state of the art. *Journal of Food Engineering*, 53 (4), 325–340.
13. Sukhanova, M., Mudarisov, S., Zabrodin, V., Bondarev, A., & Gallyamov, F. (2022). Analysis of the interaction of seeds with a centrifugal disk working body of a chamber-type treater. *Scientific Reports*, 12, 5420. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09204-x>
14. Vechera, O. M., Tesliuk, B. V., & Kuianov, V. V. (2025). Pidvyshchennia yakosti protriuvannia nasinnia s.-h. kultur z modyfikovanim vibratsiynym bunkerom. *Kramarovski chytannia : zbirnyk tez dopovidei XII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii z nahody 118-yi richnytsi vid dnia narodzhennia doktora tekhnichnykh nauk, profesora, vitseprezydenta UASHN Kramarova Volodymyra Savovycha (1906–1987)*. Kyiv, P. 311–313. [in Ukrainian]
15. Vechera, O. M., & Kuianov, V. V. (2021). Pidvyshchennia yakosti protriuvannia nasinnia silskohospodarskykh kultur za dopomohoiu kombinovanoi obrobky. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*, 12 (4), 109–115. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.04> [in Ukrainian]
16. Vechera, O. M., & Kuianov, V. V. (2023). Vdoskonalennia inertsiiino-fryktsiinoho protriuvacha nasinnia. *Ahrarna enerhetyka v XXI storichchi: dosiahnennia i perspektivy rozvytku : zbirnyk tez dopovidei II Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*. 14 lystopada 2023 r. [in Ukrainian]

17. Vechera, O. M., & Kuianov, V. V. (2023). Tekhnolohiia ozonuvannia dlia protriuvannia nasinnia. *Suchasni problemy zemlerobskoi mekhaniky: zbirnyk tez dopovidei XXIV Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii*. Kyiv, P. 144–146. [in Ukrainian]
18. Grohn, P., Lawall, M., Oesau, T., Heinrich, S., & Antonyuk, S. (2020). CFD-DEM simulation of a coating process in a fluidized bed rotor granulator. *Processes*, 8 (9), 1090. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8091090>
19. Song, Y., Zhou, T., Bai, R., Zhang, M., & Yang, H. (2023). Review of CFD-DEM modeling of wet fluidized bed granulation and coating processes. *Processes*, 11 (2), 382. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11020382>
20. Liu, H., Ma, X., Hou, Z., Chen, L., Tan, A., & Liu, Y. (2025). Simulation and experimental study on the optimization of operating parameters for coating pellets of *Agropyron* seeds. *Agriculture*, 15 (19), 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15192017>
21. Pasha, M., Hare, C., Ghadiri, M., Gunadi, A., & Piccione, P. M. (2016). Effect of particle shape on flow in discrete element method simulation of a rotary batch seed coater. *Powder Technology*, 296, P. 29–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.055>

Elchyn Aliiev, Prof., DSc. (Engineering), Senior Researcher

Nataliia Ponomarenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Tymofii Rud

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Numerical Simulation of the Seed Pelleting Process in a Drum Apparatus

The article presents the results of numerical simulation of the seed pelleting process in a drum apparatus using the Simcenter STAR-CCM+ software environment.

To describe seed motion and the application of the nutrient composition, a combination of the Discrete Element Method (DEM) and the Lagrangian Multiphase Approach (LMP) was employed. The developed model made it possible to reproduce the processes of seed mixing, spraying of the nutrient solution, droplet deposition on the seed surface, and formation of the pelleting coating. During the study, the effects of drum rotational speed, pelleting composition flow rate, seed bed height, and blade inclination angle on coating uniformity and apparatus productivity were evaluated. Based on the numerical experiment, regression relationships were obtained that adequately describe the seed pelleting process and make it possible to predict changes in efficiency criteria depending on the operating modes of the apparatus.

It was established that the best pelleting quality indicators are achieved at a drum rotational speed of 14–15 rpm, a pelleting composition flow rate of 18–20 mL/min, a seed bed height of 0.22–0.26 m, and a blade inclination angle of 8–10°. Under these conditions, process productivity reaches 50–52 kg/min, the non-uniformity of pelleting coating formation does not exceed 2.5–3.0%, and energy consumption is reduced by 15–18%. The obtained results can be used to substantiate the design and technological parameters of drum pelletizers and to improve the efficiency of pre-sowing seed treatment.

seeds, pelleting, nozzles, device, drum apparatus, spraying, distribution, productivity, parameters, numerical simulation, Discrete Element Method, Lagrangian Multiphase Approach

Одержано (Received) 22.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 25.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 26.06.2026