

## ДИСКРЕТНА МОДЕЛЬ ДРАЖИРОВАНОЇ НАСІНИНИ

**Є. Сербій**, канд. техн. наук,  
*УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого*

*В статті викладено основні принципи побудови дискретної моделі дражированої насінини.*

**Ключові слова:** *дискретна модель, дражироване насіння, упаковка часток, трикубичний сплайн, пісок, рідина, бентоніт, гумат.*

**Актуальність проблеми.** В сільськогосподарському виробництві особливо актуальним в останній час є використання дражированого насіння овочевих та деяких технічних культур, найбільша врожайність яких спостерігається в зонах зрошеного землеробства. Попит на таке насіння обумовлено багатьма чинниками, серед яких значне місце займають: поліпшення якості висіву насіння зі складною формою поверхні, а також покращення умов проростання насіння та живлення рослин в ранній період вегетації. Здатність насіння до тривалого зберігання, збереження цілісності форми під час висіву, можливості насичуватись та утримувати вологу багато в чому визначаються кількісним та якісним складом композиції для дражування. За попередніми дослідженнями [1, 2] встановлено, що в якості базових компонентів, найбільш наближених до природного середовища розвитку рослин - ґрунту, які формують каркас драже та визначають його фізико-механічні властивості, доцільно використовувати пісок, як основу, та гумати й бентоніт, як в'язучі фізико-хімічно активні компоненти.

Задачу обґрунтування кількісного складу композиції для дражування можливо вирішити двома підходами: фізичним або математичним моделюванням. Різноманітність проявів властивостей композиції для оболонки дражированого насіння (гідрофільні, міцнісні) обумовлює необхідність проведення значної кількості зтяжних досліджень з фізичною моделлю, що є недоцільним з точки зору економії часових та матеріальних витрат на проведення експериментальних досліджень.

Складні за внутрішніми зв'язками і великі за кількістю елементи оболонки дражированого насіння економічно важко піддаються прямим способам моделювання з отриманням детермінованих аналітичних рівнянь континуальних моделей. Тому найчастіше, для побудови і вивчення подібних складних систем переходять до компютерних імітаційних методів з дискретизацією як самих елементів системи, так і часу.

Сучасний етап розвитку людства характеризується інтенсивним впровадженням нових інформаційних технологій в усі галузі людської

діяльності — сучасні потужні супер-комп'ютери дозволяють проводити моделювання від молекулярних систем чисельністю понад один мільярд молекул до моделювання руху та взаємодії галактик [3]. Отже, поява новітніх інформаційних технологій не лише збільшує можливості моделюючих систем, але й дозволяє застосовувати велике різноманіття моделей та способів їх реалізації. Удосконалення обчислювальної, та телекомунікаційної техніки призвело до подальшого розвитку методів машинного моделювання, без яких неможливе вивчення процесів і явищ, а також побудова великих і складних систем [4]. Отже, розроблення дискретної моделі дражированого насіння є першочерговою задачею для моделювання з подальшим прогнозуванням та програмуванням його властивостей.

**Мета роботи.** Розробити основні принципи побудови дискретної моделі дражированої насінини.

**Аналіз останніх досліджень.** На сьогодні галузь дражування насіння у вітчизняних та пострадянських наукових закладах майже незалежно розвивається за двома паралельними напрямками: частка дослідників обґрунтовує монокомпозиційний склад оболонки за деякими агрономічними показниками, найчастіше майже без врахування агро-кліматичних умов вирощування, властивостей ґрунтів, наявності зрошувальних систем, можливостей обладнання для дражування насіння – виключно агрономічний напрям досліджень. Інша частина дослідників більшу увагу приділяє саме засобам для дражування, які б задовільно виконували технологічний процес з набагато раніше розробленими композиціями – суто технічний напрям досліджень. Таким чином, поява, за агрономічним напрямом, новітніх прогресивних композицій та новітніх, за технічним напрямом, технологічних підходів для дражування при роздільному дослідженні стримується відсутністю відповідного обладнання для дражування, а розвиток новітнього обладнання неможливий без існування новітніх композицій та підходів щодо їх використання. Значні прискорені позитивні результати могли б бути при синергії досліджень з двох споріднених напрямів – агрономічного та технічного.

Так, серед вітчизняних дослідників Мотренко С.М. досліджував зміну фізико-механічних та біологічних властивостей дражированого насіння цукрових буряків залежно від маси дражировальної оболонки [5]. Марченко С.І. вивчав біологічні особливості та продуктивність дражированого і інкрустованого насіння гібридів цукрових буряків залежно від прийомів його обробки [6]. Белкот В.З. визначав вплив захисно- стимулюючих речовин при пошаровому їх нанесенні під час дражування насіння на ріст і продуктивність цукрових буряків [7].

Янченко А.В. встановлював прийоми підвищення якості коренеплодів столової моркви шляхом визначення оптимального складу та кількості суміші для дражування, а також норми та глибини висіву насіння на вихід стандартної

продукції [8]. Існують також наукові дослідження за технічними спеціальностями присвячені обґрунтуванню параметрів дражираторів [9, 10, 11].

Переважно в закордонній практиці застосовуються декілька специфічних способів і технологій обробки насіння [12]. Так фахівці насінневої компанії Інкотек для поліпшення якостей насіння розрізняють наступні технології: пеллетінг (багатошарове закачування насіння), одношарове закачування насіння, праймінг, апгрейдинг, дезінфекція (поліпшення стійкості насіння до хвороб), які виконують на найкращому обладнанні голландської фірми Seed Processing Holland and Leba [13].

Пеллетінг або дражування - це закачування насіння в оболонку, що складається з різних шарів, кожний з яких представлений певною речовиною (рис. 1). Пеллетінг дозволяє зробити насінини більше універсальними у формі, розмірі, вазі. Крім поліпшення процесу посіву пеллетінг може забезпечити накладення шарів фунгіциду або інсектициду.

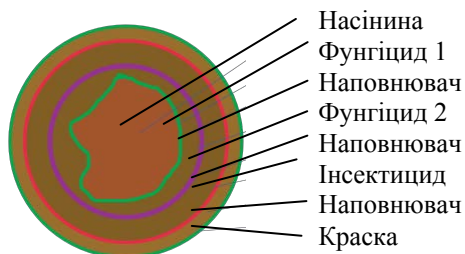


Рисунок 1 – Схема дражированої насінини

Інкотек пропонує широкий вибір способів дражування насіння, що варіюються у вазі, розмірі, формі й кольорі (це залежить від умов клімату, у якому насіння висівають):

- сплітпілл - покриваючий матеріал дозволяє насінині швидко й легко одержувати вологу й кисень. Шар не розчиняється, а розколюється надвоє, тим самим, створюючи оптимальні умови для швидкого проростання насінини. Сплітпілл лайт - полегшені шари покриття насінини, для посадки при коливанні рівня вологості;

- спліткот - спеціально розроблений процес нанесення композицій для посадки насіння у відкритому ґрунті (шари розкриваються від контакту з водою й швидко відділяються від насінини, не перешкоджаючи надходженню вологи й кисню до насінини). Має схожі характеристики зі сплітпіллом, але відрізняється іншим складом шарів. Спліткот спеціальний - насіння, оброблене за технологією праймінг (проростання при стресових ситуаціях, більше швидке проростання). Спліткот лайт - полегшений варіант спліткот, для посадки при коливанні рівня вологості;

- топкот - метод, розроблений спеціально для теплиць у (суб) тропічних зонах. Топкот лайт - полегшений варіант для посадки при коливанні рівня вологості;

- санокот - спеціально розроблений метод, коли крім фунгіциду насінини покриваються шаром інсектициду;

- бетакот - спеціально розроблений метод (в основному для цукрового й червоного буряку), коли насінини покриваються шаром дезінфікуючих речовин;

- мультисід - під оболонкою більш, ніж одна насінина, для того, щоб домогтися 100% проростання. Використовується для розсадників.

За принципом переоснащення вузькоспеціалізованих машин фармацевтичної промисловості працює фірма KWS при дражируванні насіння. Методом киплячого шару, вискоєфективні інсектициди й фунгіциди багатьма шарами наносяться на задану поверхню, що забезпечує точне дозування й надійність дії протруйників.

Дражироване насіння агрофірми «УРОЖАЙКА» має високу механічну міцність, у той же час у воді або вологому середовищі оболонка драже руйнується за 3-5 секунд. Технології захищені патентом РФ № 2283562 від 16 червня 2003 р.

Також у іноземних виробників існує технологія дражирування пророщеного насіння, що дозволяє отримати більш ранні сходи, але цей прийом висуває більш жорсткі вимоги як до якості дражирування та утримання дражированого насіння, так і до ґрунтових умов.

Таким чином, відсутність вітчизняних досліджень за напрямом моделювання та прогнозування властивостей дражированого насіння підтверджує актуальність теми.

**Основна частина.** За раніше зробленими дослідженнями [1, 2] запропоновано композицію для дражирування у складі піску, бентоніту та гуматів. Функцією піску є формування пористого об'єму, що сприятиме активному обміну повітрям між насінною у драже та зовнішнім середовищем, та утриманню необхідної для нормального розвитку насінини кількості капілярної вологи. Задача бентоніту та гуматів набагато складніша і полягає у зв'язуванні частинок піску – піщинок, з забезпеченням достатньої міцності драже у сухому стані й необхідної твердості для нормального розвитку рослин у вологому стані, а також в утриманні макро- і мікроелементів у легкодоступній рослинам хелатній формі.

В конденсованому стані гумати є аморфними речовинами - структура упорядкування часток (молекул) має ближній порядок та не має дальнього порядку, а бентоніт хоча і відноситься до слоїстих (або листових) силікатів, має змінну кристалічність від структурно не упорядкованих фаз до аморфних речовин. Подібна аморфна структура спостерігається і у рідинах – відсутній дальній порядок, отже аморфні тіла прийнято вважати дуже густими (в'язкими) рідинами. При зовнішніх діях аморфні речовини проявляють

одночасно пружні властивості, подібно до кристалічних твердих речовин, та в'язкість, подібно до рідини (дослідження з крапаючим піском в університеті у Квінсленді, започаткованим у 1927 році – краплини бітуму формуються та падають з періодичністю у десятиріччя). Так при короткотермінових діях (ударах) аморфні речовини поведуть себе як тверді речовини та при сильному ударі розколюються на частини, але при дуже тривалій дії (наприклад, розтягуванні) вони линуть.

Вагомий вплив на фізико-механічні властивості гумітів та бентоніту чинить їх вологість. Не дивлячись на різні структури упаковки їх молекул та часток, вони розчиняються у воді - внаслідок наявності у молекул гуматів [14, 15, 16, 17] полярних груп ( $-\text{OH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{CO}_2\text{OH}$ ,  $-\text{NO}_2$  і т.п.) вони повністю розчиняються у воді, молекули якої також сильно полярні, і утворюють істинний розчин. Елементарні листи бентоніту з відстанню між ними у 1,2 нм [18], що складаються з великої кількості молекул, внаслідок їхньої полярності також розчиняються у воді, але утворюють колоїдний розчин. Зі зростанням дисперсності часток підвищується міцність композиції не тільки за рахунок збільшення кількості контактів між частками, але й внаслідок створення більш однорідної структури зі зменшенням кількості і інтенсивності дефектів. При цьому волога є фазою, яка передає структурі речовини перепади осмотично-капілярних тисків через ланцюг взаємодій функціональних груп з молекулами води, які виступають у ролі «лікуючих» факторів дефектів нанорозмірної структури [19]. Отже, молекули фізично-зв'язаної вологи взаємодіють з активними центрами ( $\text{COOH}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{CONH}_2$ ) та мають можливість зшивати окремі наночастки в агрегати, змінюючи структуру матеріалу [20].

Таким чином, у зволоженому стані бентоніт і гумати мають властивості в'язкої рідини, якій притаманна в'язкість, щільність і поверхневий натяг. Тому, при формоутворенні драже для з'єднання піщинок, бентоніт і гумати використовують насиченими вологою – в цьому стані вони мають більшу рухливість складових їх часток, більшу пластичність та меншу в'язкість. Оскільки адгезія обумовлена міжмолекулярною взаємодією (сили Ван-дер-Ваальса, полярні сили, утворення хімічних зв'язків або взаємна дифузія) у поверхневому шарі, то зволожені бентоніт та гумати викликають міцнішу адгезію до піщинок. У випадку коли поверхня змочується рідиною міжмолекулярна взаємодія контактуючих речовин у суміжній фазі сильніша ніж у однорідній речовині, в цьому випадку адгезія виявляється сильнішою ніж когезія (зчеплення всередині речовини) та при прикладанні зовнішнього зусилля на від'єднання суміжних фаз відбувається когезійний розрив, тобто розрив у об'ємі найменш міцного зі з'єднаних матеріалів.

В запропонованій композиції для дражировання з'єднання декількох піщинок відбувається в'язкою сумішню гуматів та бентоніту з водою, які укривають поверхні піщинок та утворюють рідинні мостики між ними. Об'єм

в'язучої суміші  $V_p$  між піщинками напряму залежить від кількісного складу композиції та від їх діаметрів. Припустимо, що маємо композицію для дражирування в якій масова доля піску складає  $n_n$ , гуматів –  $n_g$ , бентоніту –  $n_b$ , щільність розподілу піщинок діаметром  $d_n$  –  $p(d_n)$ , а його математичне очікування –  $d_{n\text{cp}}$ . Тоді площа поверхні однієї піщинки

становить:  $S_{1n} = 4\pi d_n^2$ , звідки:  $d_n = \sqrt{\frac{S_{1n}}{4\pi}}$ . Враховуючи те, що діаметр

піщинок є випадковою величиною, знайдемо закон розподілу їх площі поверхні, як функцію випадкової величини [29]:

$$p(S_{1n}) = (d_n)_S \cdot p(d_n).$$

Математичне очікування площі поверхні однієї піщинки знайдемо з виразу:

$$S_{1n\text{cp}} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{1n} \cdot p(d_n) \cdot dd_n, \text{ тоді: } S_{1n\text{cp}} = 4 \cdot \pi \cdot d_{n\text{cp}}^2.$$

При щільності піску  $\rho_n$  об'єм однієї піщинки становить  $V_{1n} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_{n\text{cp}}^3$ , а її маса –  $m_{1n} = V_{1n} \cdot \rho_n$ , або  $m_{1n} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_{n\text{cp}}^3 \cdot \rho_n$ . Тоді кількість піщинок в одному грамі становить:  $N_n = \frac{1}{m_n}$ , або

$N_n = \frac{6}{\pi \cdot d_{n\text{cp}}^3 \cdot \rho_n}$ . А площа вільної поверхні в 1 грамі піску буде

дорівнювати:  $S = S_{1n\text{cp}} \cdot N_n$ , або  $S = \frac{24}{d_{n\text{cp}} \cdot \rho_n}$ .

Внаслідок того, що міжмолекулярна взаємодія (адгезія) складових речовин композиції для дражирування відбувається в основному за рахунок короткодійчих сил або дифузії і діаметр піщинок на це не впливає, то прийемо, що на їх поверхнях суміш з гуматів та бентоніту розподілена шаром однакової товщини. Кожна піщинка взаємодіє з усіма сусідніми, кількість яких визначається координаційним числом  $K$ , і шар вологого бентоніту і гумусу розподіляється між сусідніми піщинками пропорційно до їх діаметрів.

Координаційне число визначається способом упаковки піщинок. Проблема упаковки систем часток має відношення до багатьох наук. Теоретичною стороною даної проблеми займалися такі видатні натуралісти як Іоган Кеплер, Ісаак Ньютон та Джеймс Грегорі, Карл Гаусс, Михайло

Ломоносов, які заклали основи вивчення структури матеріальних тіл, що отримала у сучасній науці назву теорії щільно упакованих систем часток.

Одноєю з проблем теорії щільно упакованих часток є отримання достовірної інформації о внутрішній структурі стохастичних упаковок, сформованих на основі часток щільно упакованих систем. Стохастична упаковка являє собою складну ієрархічну структурно-неоднорідну систему, яка складається з випадково розташованих жорстких часток, що знаходяться між собою у контактній взаємодії. В стохастичних упаковках частки розташовані настільки близько одна до одної, що їх взаємний вплив суттєво відображається на поведінці всієї системи в цілому.

Отже, основною задачею вивчення та практичного використання теорії щільно упакованих систем часток є прогнозування фізичних процесів в композиціях для дражирування та отримання драже з наперед заданими властивостями. Від гранулометричного складу, щільності упакування піщинок та кількості їх контактів між собою залежать міцність і пористість оболонки драже, повнота зчеплення між компонентами для дражирування і інші властивості дражированого насіння. Так, найбільш щільно – на 74,05%, заповнюють простір монодисперсні частки при кубічній щільнішій упаковці або гексагональній щільнішій упаковці й більш щільно частки розташувати неможливо. Об'ємноцентрована кубічна упаковка дає щільність заповнення простору 68,02%, гексагональна щільна упаковка – 60,46%, кубічна щільна упаковка – 52,36% [21]. Якщо упаковка часток в об'ємі не упорядкована (аморфна), то за даними чисельних та натурних експериментів [22] її щільність не перевищує 64% (рис. 2).

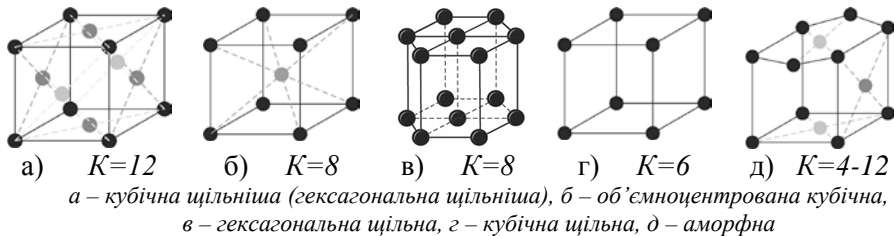


Рисунок 2 – Види упаковки часток та їх координаційні числа  $K$ :

На жаль, аналітичними методами розрахувати упакування полідисперсних часток неможливо [23]. Скоротити витрати часу на проведення реальних експериментів та з'ясувати основні закономірності вже на початковій стадії дозволяє комп'ютерне моделювання за методом дискретних елементів. На даний час запропоновано декілька моделей для комп'ютерних розрахунків часток різноманітних форм [24, 25, 26] та розроблено багато алгоритмів для отримання щільних упаковок. Їх можливо

умовно розділити на дві групи: алгоритми послідовного додавання часток і алгоритми послідовних ітерацій.

Алгоритми послідовного додавання дозволяють достатньо просто отримати випадкові упаковки будь-яких розмірів для часток довільних розмірів та форм для невеликої щільності упакування. У випадку сферичних часток однакового розміру ця межа для так званого методу «упав - покотився» становить близько 58%. Суть його полягає в тому, що до вже існуючої проміжної структури послідовно додаються сфери згідно з встановленими правилами.

За цим методом І. С. Кузнецовим розроблено комп'ютерну модель, що дозволяє розраховувати щільність (пористість) упаковки гомогенних і гетерогенних порошкових композицій. При старті моделі імітується процес почергового падіння часток у паралелепіпед з заданою висотою та стороною квадратної основи. Зокрема розмірів паралелепіпеду в якості вихідних параметрів задаються радіуси часток та режим їх поведінки при контактах між собою. Процес моделювання складається з декількох фаз. На початковому етапі з використанням методу Монте-Карло випадковим чином розігрується положення частки у площі на грані протилежній основі паралелепіпеду та її радіус. Наступним кроком імітується падіння частки. В залежності від режиму частка взаємодіє з раніше таким самим чином створеними частками та фіксується у просторі, після чого генерується наступна частка.

Для розрахунку положення частки використовується геометричний підхід – частки займають положення, що відповідають локальному мінімуму їх потенційної енергії. При цьому частки вважаються сферичними, а зіштовхування між ними – абсолютно непружними. За даним методом дослідження встановлено, що наявність у композиції часток різних розмірів чинить суттєвий вплив на щільність упаковки системи: чим більша відмінність в розмірах часток, тим менша щільність упаковки. Зокрема цього, неоднорідність часток за розмірами також зменшує кількість контактів часток з сусідніми. З практичної точки зору це означає, що для отримання щільних та міцних матеріалів частки повинні бути якнайменш дисперсні за розмірами [27].

Інший підхід для збільшення щільності заповнення простору полягає у використанні часток з дискретним розподілом їх розмірів та заповненням меншими частками проміжків між більшими. Так, за даними досліджень [22], при монодисперсному заповненні часток щільністю у 64%, використання трифракційних композицій часток з відношенням їх розмірів 1:1000 дозволяє заповнити об'єм на 89,4%.

Для того щоб подолати межу у 58 % і досягти експериментально визначених у випадкових упакуваннях значень порядку 63 %, необхідно використовувати більш складні методи генерації упаковок. Різниця у 5 % потребує кардинальних змін в алгоритмі генерації.



Одним з алгоритмів, за допомогою якого можливо відносно швидко отримати упаковки зі щільністю більш 60 %, є JT-алгоритм, що відноситься до категорії алгоритмів «послідовного набування». Він дозволяє генерувати великі упаковки з досить великою щільністю (більш 60% у випадку однакових сферичних часток) за досить малий час (3600 часток за декілька годин). Суть його полягає в послідовному аналізі пар часток. Виявленні пар пересічних часток та їх розмежуванням на відстань перехресування.

Існує проблема генерації великих (більше 6000 часток) упаковок. Часові витрати на генерацію упаковки з використанням JT-алгоритму зростають пропорційно  $\sim 3N$ . Одним з методів рішення даної проблеми є створення регулярної упаковки. Спочатку генерується мікроупаковка з пересічними межами, тобто частка сфери, що виходить за межі мікроупаковки, відображається на протилежній грані. Далі мікроупаковка мультиплікується на весь об'єм модельованого пористого середовища. Вочевидь, що при зменшенні розмірів мікроупаковки зменшуються загальні часові витрати на створення кінцевої упаковки. Однак, якщо характеристична довжина процесів, що виникають у макроупаковці, перевищує розміри мікроупаковки, модель досліджуваного процесу буде неадекватною [28].

За агрономічними дослідженнями [35] встановлено, що для нормального повітря- та вологообміну між насінною та зовнішнім середовищем, щільність ґрунту у зоні насінневого ложа повинна бути в межах  $1,1-1,3 \text{ кг/м}^3$ , що при щільності твердої фази ґрунту  $2,5-2,65 \text{ кг/м}^3$  відповідає скважності ґрунту  $41,5-52\%$ , або щільсті укладки ґрунтових часток в межах від 48 до  $58,5\%$ . Розміри капілярних пор повинні становити від  $30 \text{ мкм}$  (мезопори) до  $2000 \text{ мкм}$  (тонкі макропори) [30]. Це означає, що упаковка складових часток ґрунту близька до аморфної і не має дальнього порядку. Отже, при моделюванні оболонки дражированого насіння можливо використовувати більш ресурсощадний алгоритм послідовного додавання.

При моделюванні оболонки драже, відстані між двома сусідніми піщинками будуть перевищувати суму їх радіусів внаслідок присутності в'язучих гумітів та бентоніту, які будуть створювати з'єднувальний мостик між ними. Його об'єм залежить від кількісного складу композиції для дражування, діаметрів суміжних піщинок та їх координаційних чисел, які, взагалі при аморфній упаковці, можуть бути для кожної піщинки різними.

При заданій композиції, маси гумітів та бентоніту на  $1 \text{ грам}$  піску

становлять відповідно:  $m_{z1} = \frac{n_z}{n_n}$ ,  $m_{b1} = \frac{n_b}{n_n}$ . Тоді при щільності гуматів  $\rho_z$

та бентоніту  $\rho_b$  їх об'єм на  $1 \text{ грам}$  піску становить:

$$V_{z1} = \frac{m_{z1}}{\rho_z} = \frac{n_z}{n_n \cdot \rho_z}, \quad V_{b1} = \frac{m_{b1}}{\rho_b} = \frac{n_b}{n_n \cdot \rho_b}.$$

Отже, об'єм гуматів та бентоніту на  $1 \text{ см}^2$  площі поверхні піску становить:  $V_{sn} = \frac{V_{z1} + V_{\sigma 1}}{S} = \frac{d_{ncp} \cdot \rho_n}{24 \cdot n_n} \left( \frac{n_z}{\rho_z} + \frac{n_{\sigma}}{\rho_{\sigma}} \right)$ . З чого знайдемо об'єм гумітів та бентоніту, який перепадає на 1 координаційне число піщинки діаметром  $d_{ni}$ :  $V_{nli} = \frac{S_{1i}}{K_i} V_{sn} = \frac{\pi \cdot d_{ni}^2}{K_i} \cdot \frac{d_{ncp} \cdot \rho_n}{6 \cdot n_n} \left( \frac{n_z}{\rho_z} + \frac{n_{\sigma}}{\rho_{\sigma}} \right)$ . Тоді об'єм гумітів та бентоніту між двома піщинками діаметром  $d_{ni}$  та  $d_{nj}$  становить:

$$V_{nlij} = \frac{S_{1i} + S_{1j}}{K_i} V_{sn} = \pi \cdot \left( \frac{d_{ni}^2}{K_i} + \frac{d_{nj}^2}{K_j} \right) \cdot \frac{d_{ncp} \cdot \rho_n}{6 \cdot n_n} \left( \frac{n_z}{\rho_z} + \frac{n_{\sigma}}{\rho_{\sigma}} \right). \quad (1)$$

В процесі дражування при з'єднанні піщинок сумішшю бентоніту та гуматів з водою, які проявляють у такому стані більш виражено властивості рідини, внаслідок поверхневого натягу  $\sigma$  вони будуть прагнути зайняти положення рівноваги з мінімумом потенційної енергії рідинного зв'язку [34]. Згідно з рівнянням Лапласа, поверхня рідини з середньою кривизною  $H$  між піщинками шароподібної форми з центрами ваги у точках  $O_1$  та  $O_2$  являє собою ундулоїд (рис. 3) та в загальному вигляді описується еліптичним інтегралом [31]:

$$x = \int \frac{Hy^2 + A}{\sqrt{y^2 - (Hy^2 + A)^2}} dy. \quad (2)$$

де  $A$  – постійна інтегрування.

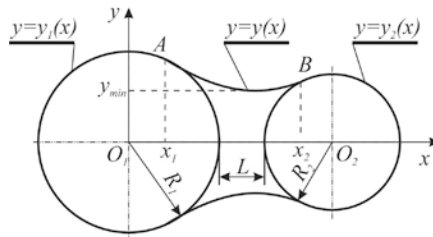


Рисунок 3 – Розрахункова схема зчеплення двох піщинок

При рівноважному положенні, коли будь-які зовнішні дії відсутні, викривлення поверхні рідини на межі з газовою фазою відбувається як наслідок дії поверхневого натягу рідини, яке прагне скоротити поверхню розподілу фаз та надати обмеженому об'єму рідини форму з мінімальним потенціалом сил поверхневого натягу. В цьому випадку виконується рівняння Гауса для тіл постійної середньої кривизни [33]:

$$H = \frac{dS}{dV}.$$

де  $dS$ ,  $dV$  - диференціал поверхні та об'єму відповідно;

отже, різниця тисків по обидві сторони від поверхні рідини мінімальна та середня (Ейлерова) кривизна поверхні прагне до мінімуму за модулем.

В окремому випадку при  $H=0$  - тіло обертання є катеноїдом, а його меридіан описується ланцюговою лінією, рівняння якої впливає з (2) при  $H=0$ :

$$x = \int \frac{A}{\sqrt{y^2 - A^2}} dy. \quad (3)$$

або [32]:

$$y = \frac{1}{A} \cdot ch(A \cdot x + B), \quad (4)$$

де  $B$  - постійна інтегрування.

Враховуючи те, що дражирування виконується при атмосферному тиску  $p_{атм}$ , то необхідно враховувати його дію, яка спрямована на стискання двох піщинок. За розрахунковою схемою (рис. 4) умову рівноваги при атмосферному тиску можливо записати у вигляді:

$$\Sigma F_i^x = 0, \quad F_{атм} - F_p = 0 \quad (5)$$

де  $F_{атм}$  - сила, що стискає піщинки внаслідок атмосферного тиску, Н,

$$F_{атм} = p_{атм} \cdot 4 \cdot \pi \cdot (R_1^2 - y_{k1}^2), \quad (6)$$

$F_p$  - сила, що діє на піщинки внаслідок поверхневого натягу рідини між ними, Н,

$$F_p = \sigma \cdot H \cdot 4 \cdot \pi \cdot y_{\min}^2, \quad (7)$$

підставивши (6), (7) у (5) отримаємо:

$$\sigma \cdot H \cdot y_{\min}^2 = p_{атм} \cdot (R_1^2 - y_{k1}^2). \quad (8)$$

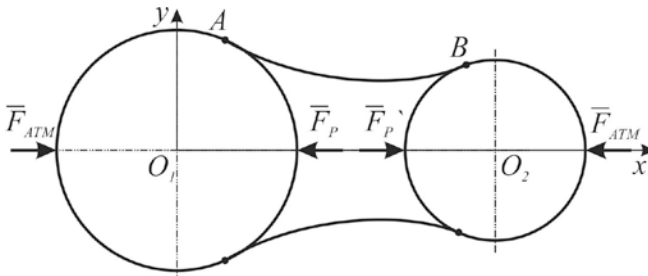


Рисунок 4 – Розрахункова схема взаємодії піщинок та рідини під атмосферним тиском

Враховуючи раніше встановлені крайові умови [31] та рівняння (8), отримаємо крайову задачу на власні значення зі змішаними граничними умовами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{y\sqrt{1+y'^2}} - \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} = H \\ V = \pi \int_{x_1}^{x_2} y^2(x) dx - \pi(R_1 - x_1)^2 \left(R_1 - \frac{R_1 - x_1}{3}\right) - \\ - \pi(x_2 - R_1 - L)^2 \left(R_2 - \frac{x_2 - R_1 - L}{3}\right) \\ \sigma \cdot H \cdot y_{\min}^2 = p_{амм} \cdot (R_1^2 - y_{k1}^2) \\ y_1(x_1) = y(x_1) \text{ та } y_2(x_2) = y(x_2) \\ y'_1(x_1) = y'(x_1) \text{ та } y'_2(x_2) = y'(x_2) \end{array} \right. \quad (9)$$

Чисельне її рішення за раніше розробленим алгоритмом [31] у математичній програмі Maple дозволяє отримати чисельні значення відстані між піщинками  $O_1O_2$  (рис. 5), діаметр  $y_{\min}$  мінімальної площі перетину об'єму рідини між піщинками, кривизну поверхні рідини  $H$ , точки перетинання рідиною кожної піщинки  $x_{k1}, x_{k2}$ , при відповідних значеннях діаметрів піщинок  $D_1, D_2$  та діаметру об'єму рідини  $D_k$  (якби рідина мала шароподібну форму). Тобто при чисельному вирішенні системи (9) отримуємо окремі точки, що задаються розмірами піщинок та об'ємом рідини між ними.

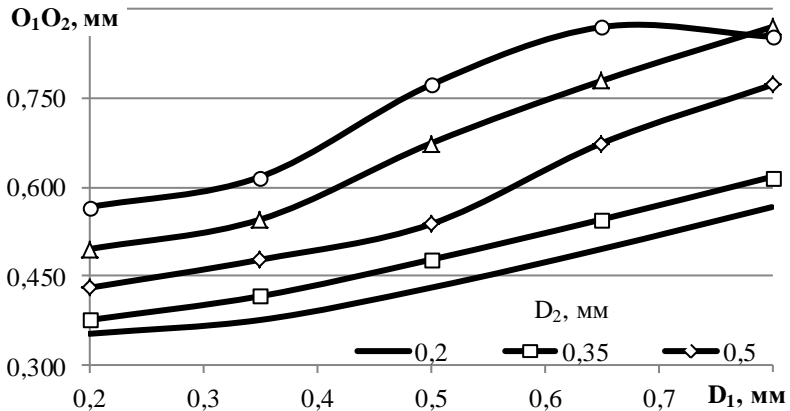


Рисунок 5 – Залежність відстані між центрами піщинок від їх діаметрів при  $D_k = 0,125$  мм

Порівняння рішень системи рівнянь (9) з умовою (8) та без неї дозволило встановити, що при взаємодії двох піщинок діаметром 0,25мм кожна з краплиною рідини діаметром 0,125 мм діаметри  $y_{\min}$  мінімальної площі перетину об'єму рідини між піщинками становлять 0,1560 та 0,1544мм відповідно. Отже для спрощення розрахунків без істотного викривлення результатів раціонально використовувати систему рівнянь (9) без (8).

Зокрема того, при побудові дискретної моделі дражированої насінини багаторазове вирішення системи рівнянь (9) за будь-яким ітераційним чисельним методом значно збільшує часові витрати, отже доцільним є заміна системи рівнянь (9) на більш просту математичну конструкцію. З точки зору максимальної швидкості її обчислення на ЕОМ більш вигідним є використання моделей у вигляді поліномів. За візуальним аналізом графічних залежностей (рис. 5) їх можливо інтерполювати поліномом 4 ступеню, який буде містити  $5^3=125$  коефіцієнтів, або трикубичним сплайном  $S = S(D_1, D_2, D_k)$ , який на кожному інтервалі буде складатися з поліному з 64 коефіцієнтів. З точки зору багаторазового обчислення на ЕОМ найбільш вигідним є використання сплайнів.

Одномірний випадок побудови сплайнів  $S = S(x)$  на одновимірній сітці  $\Delta_x: a = x_1 < x_2 < \dots < x_N = b$  досить докладно розглянуто у [36]. Трикубичний сплайн на області  $\Omega = [a, b] \times [c, d] \times [o, p]$  з введеною сіткою ліній

$$\Delta = \Delta_{D_1} \times \Delta_{D_2} \times \Delta_{D_k},$$

де

$$\Delta_{D_1}: a = x_1 < x_2 < \dots < x_N = b,$$

$$\Delta_{D_2}: c = y_1 < y_2 < \dots < y_M = d,$$

$$\Delta_{D_k}: o = z_1 < z_2 < \dots < z_L = p,$$

що ділить область  $\Omega$  на прямокутні осередки

$$\Omega = \{(x, y, z) \mid x \in [x_i, x_{i+1}], y \in [y_j, y_{j+1}], z \in [z_k, z_{k+1}]\},$$

$$i = 0, \dots, N-1; j = 0, \dots, M-1; k = 0, \dots, L-1$$

може бути представлений у вигляді:

$$S(D_1, D_2, D_k) \sum_{\alpha=0}^2 \sum_{\beta=0}^2 \sum_{\gamma=0}^2 a_{\alpha\beta\gamma}^{ijk} (D_1 - x_i)^\alpha (D_2 - y_j)^\beta (D_k - z_k)^\gamma, \quad (10)$$

де сусідні многочлени та їх перша та друга похідні гладко стиковані поміж собою. Простий метод рішення з системою лінійних рівнянь впливає з рівності трикубичного сплайна тензорному добутку одновимірних сплайнів:

$$S(D_1, D_2, D_k) = S_1(D_1) \otimes S_2(D_2) \otimes S_3(D_k). \quad (11)$$

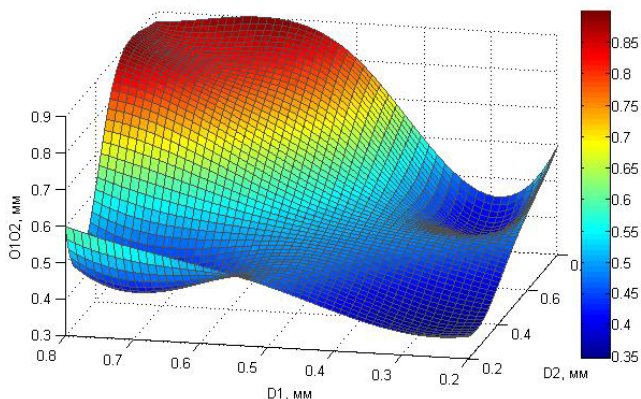


Рисунок 6 – Залежність відстані між центрами піщинок від їх діаметрів при  $D_k = 0,25$  мм

Найбільш ефективно алгоритм визначення багатовимірних сплайнів реалізовано у модулі Spline Toolbox середовища комп'ютерної математики MatLab, головним розробником якого є Карл де Бор – автор і відкривач математичних основ інтерполяції та наближення багатовимірними сплайнами. Інтерполяцією значень  $O_1O_2$ , отриманих з (9) при  $D_1 = [0,2...0,8]$ ,  $D_2 = [0,2...0,8]$ ,  $D_k = [0,15...0,45]$ , у модулі Spline Toolbox, отримано трикубичний сплайн (рис. 6) виду (10), за яким при моделюванні драже за найкоротший час можливо встановлювати відстані між піщинками.

Таким чином, при побудові дискретної моделі дражированої насінини суміш бентоніту та гумітів з водою вважається речовиною, якій притаманні властивості рідини – коефіцієнт поверхневого натягу. При дослідженні цієї моделі властивості цих компонентів залежать від поставлених задач:

- при дослідженні впливу зовнішніх силових навантажень на драже різного ступеня вологості (імітація статичних або динамічних навантажень у період експлуатації або у ґрунті) суміш бентоніту та гумітів вважаються твердими речовинами, яким притаманні модуль Юнга, допустимі нормальні та дотичні напруження та інші;

- при дослідженні поглинання води драже у ґрунті суміш бентоніту та гумітів вважаються речовинами, яким притаманні в'язкість та гідрофільні властивості: гігроскопічність, максимальна вологоємність та інші.



Рисунок 7 – Алгоритм побудови дискретної моделі дражированої насінини

Враховуючи вищевикладене, побудову тривимірної дискретної моделі дражированої насінини діаметром  $D$  можливо зобразити у вигляді алгоритму (рис. 7). Приклад двовимірної дискретної моделі композиції з піску, зволожених бентоніту та гумату зображено на рисунку 8.

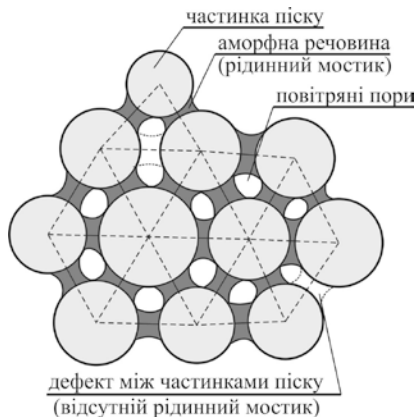


Рисунок 8 – Приклад двовимірної дискретної моделі композиції з піску, зволожених бентоніту та гумату

## Література

1. Сербий Е.К. Природные компоненты для дражирования семян // Материалы Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве». Т.2. – Минск, 2012, стр. 253-261
2. Сербій Є.К., Новохацький М.Л. Можливості пролонгованого використання елементів дражувальної оболонки насіння овочевих культур // Праці / ТДАТУ – Вип. 12. Т.4. – Мелітополь: ТДАТУ, 2012. – стр. 70-80
3. Бандман О.Л. Дискретное моделирование физико-химических процессов // Вычислительные методы в дискретной математике. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН. – 2009, №3(5). – стр. 33-49
4. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
5. Мотренко С.М. Фізико-механічні та біологічні властивості дражованого насіння цукрових буряків залежно від маси дражувальної оболонки. - Автореф. дис. ... к.т.н. – УААН, Київ, 2009. – 22 с.
6. Марченко С. І. Біологічні особливості та продуктивність дражованого і інкрустованого насіння ЧС гібридів цукрових буряків залежно від прийомів його підготовки: Автореф. дис... канд. с.-г. наук. - Ін-т цукр. буряків УААН. - К., 2005. - 19 с.
7. Белкот В. З. Вплив захисно- стимулюючих речовин при поширеному їх нанесенні під час дражування насіння на ріст і продуктивність цукрових буряків: Автореф. дис... канд. с.-г. наук. - УААН; Інститут цукрових буряків. - К., 1998. - 17с.
8. Янченко А. В. Приемы повышения качества корнеплодов столовой моркови на аллювиальных среднесуглинистых почвах Нечерноземной зоны. - Автореф. дис. ... канд.техн. наук – ГНУ – ВНИИО Россельхозакадемии, Москва, 2008. – 23 с.
9. Чирков А. М. Повышение качества дражирования семян сахарной свёклы с обоснованием параметров дражиратора: Автореф. дис. ... к.т.н. - Пенз. гос. с.-х. акад., - Пенза, 2010. – 20с.
10. Путилин П. И. Влияние технологии дражирования семян на урожай и качество сахарной свеклы: Дисс. ... канд.сельск.-хоз.наук – ВСХА. - Воронеж, 2005. – 131 с.
11. Сохроков А. М. Совершенствование технологии предпосевной подготовки и оптимизация параметров установки для дражирования семян овощных культур : Дисс. ... к.с.-х.н. – Нальчик, 2002. – 130 с.
12. INCOTEC (Integrated coating & seed technology) [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.semagro-msw.ru/incotec>
13. Holland Seed Coating Systems [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www.hollandseedcoating.com](http://www.hollandseedcoating.com)
14. Куликова Н. А. Защитное действие гуминовых веществ по отношению растений в водной и почвенной средах в условиях



абиотических стрессов. – дисс. ... докт.техн.наук, МГУ им, М. Ломоносова, 2008 г. – 302 с.

15. Перминова И. В. Анализ, классификация и прогноз свойств гумусовых кислот. – Автореф. ... докт.хим.наук, МГУ им, М. Ломоносова. – 2000 г. – 50 с.

16. Ильина А. А., Маслов С. Г., Юдина Н. В. Исследование состава натриевых и аммониевых гуминовых кислот. – Химия растительного сырья. – 2007, №2. – стр. 85-88,

17. Каюгин А. А., Журавский Д. В. Наноморфология адсорбционного слоя гуминовых кислот на поверхности каолинита. – Вестник тюменского государственного университета. – 2009. - №6. – стр. 267-273

18. Бревнов П. Н. Нанокomпозиционные материалы на основе полиэтилена и монтмориллонита: синтез, структура, свойства: дисс. ... канд. хим. наук. - Москва, 2008. - 130 с.

19. Афанасьев А. Е. Наноструктура и ее влияние на физико-технологические свойства торфяных систем. // Торф и бизнес. – 2008, №1(11)

20. Афанасьев А. Е., Ефремов А. С. Теоретическая прочность сформированных торфяных тел // ТГТУ. – 2009. - №8. – стр. 252-261

21. Кузьмичева Г.М. Теория плотнейших шаровых упаковок и плотных шаровых кладок. - М.: МИТХТ, 2000 г. – 36 с.

22. Королев Л. В., Лупанов А. П., Придатко Ю. М. Плотная упаковка полидисперсных частиц в композитных строительных материалах // Современные проблемы науки и образования / ЯГТУ. – 2007. – № 6. – стр. 109-114

23. Остерле Ж. Упаковки шаров // Труды семинара Н. Бурбаки за 1990 г.: Сб. статей: пер. с англ. и франц. / Сост. В.А. Васильев. М.: Мир, 1996.

24. Волошин В.П., Медведев Н.Н., Фенелонов В.Б., Пармон В.Н. Исследование структуры пор в компьютерных моделях плотных и рыхлых упаковок сферических частиц // Журнал структурной химии. - Т. 40. – 1999. - №4. – стр. 46-60

25. Alexander V. Potapov, Charles S. Campbell. A fast model for the simulation of non-round particle // Granular Matter. - №1(1). – 1998(18). – p. 9-14

26. Alexander Schinner. Fast algorithms for the simulation of polygonal particles // Granular Matter. - № 2. - 1999. – p. 35-43

27. Кузнецов И.С., Тарасова Е.Ю., Кузнецов С.И., Панин А.С., Петров А.Л. Особенности упаковок частиц в порошковых системах и их влияние на процесс лазерного спекания // Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. Лазерная техника и технология / Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 8. – 2006. – стр. 429-434

28. Мигаль Л. В. Математическое и имитационное моделирование стохастической упаковки систем сферических моночастиц в пространствах низкой размерности: дисс. ... канд. физ.-мат. – Белгород. – 2005. - 124 с.

29. Печинкин А.В. Теория вероятностей \ А.В. Печинкин, О.И. Тескин, Г.М. Цветкова. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - 456 с.
30. Апарин Б.Ф. Почвоведение: уч. — М.: Академия, 2012. - 256 с.
31. Сербій Є.К. Обґрунтування допустимої сфери застосувань насінневих дражувальних котлів. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції «Технічний прогрес у сільському господарстві». – Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2012. – стор. 108
32. C.F.Gauss, Theorie der Gestalt von Flüssigkeiten, Leipzig, 1903.
33. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 2. Термодинамика и молекулярная физика. - М., Наука. – 1975. – 565с.
34. Сербий Е.К. Методика обработки данных седиментационного анализа с использованием сплайн-сглаживания // Инновационные идеи молодых исследователей для АПК России: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Том 3. – Пенза: РИО ПГСХА, 2013. – стр. 151-152

#### ***Аннотация***

*В статье изложены основные принципы построения дискретной модели дражированных семян.*

#### ***Summary***

*Pelleted seed discrete model-building technique is described in this article.*