

УДК 631.311;631.432;631.434 <https://doi.org/10.31713/vt2201919>

Лук'янчук О. П., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ РОЗПУШЕНОГО ҐРУНТУ ПІСЛЯ ДІЇ КРИВОЛІНІЙНИМ РОБОЧИМ ЕЛЕМЕНТОМ ЯРУСНОГО ГЛИБОКОРОЗПУШУВАЧА

Визначено необхідність моделювання теоретичної структури розпушеного ґрунту для подальшого дослідження зміни його водно-фізичних властивостей. Проаналізовано можливі варіанти моделей формування макроелементів ґрунту після розпушення. Обґрунтовано вибір найбільш раціональної моделі після дії криволінійної поверхні. Проведені теоретичні дослідження залежності фізичних властивостей розпушеного ґрунту залежно від конструктивних і технологічних передумов.

Ключові слова: структура ґрунту, розпушення, модель, макроелемент.

Постановка проблеми. Питання раціонального використання водних і земельних ресурсів меліорованих земель визначає необхідність створення малоенергоємного способу диференціації ступеня дренажності ґрунту для покращення поверхневого і внутрішньогрунтового стоку в періоди з перевищенням норм опадів та проведення агроеліоративних заходів, спрямованих на збільшення акумулюючої здатності активного шару ґрунту та збагачення його поживними елементами для подальшого використання в посушливі періоди [1].

Як показують практика та накопичений досвід агровиоробництва, вертикальний ґрунтовий профіль сільгоспугідь повинен мати протиерозійний верхній шар (0...0,05 м), кореневмісний шар (0,05...0,4 м) і нижній фільтраційний шар (0,4...0,8 м). При цьому, оптимальна структура (відсоткове співвідношення за масою грудок «цінних» та інших розмірів) кожного з цих шарів різна і повинна бути відповідною до призначення кожного з них [1; 2].

У змінних кліматичних умовах глибоке розпушення може бути найбільш ефективним альтернативним заходом дорогій реконструкції існуючих меліоративних систем, і, одночасно, ефективним адап-

тивним засобом для акумуляції вільної ґрунтової вологи.

Однак для цього необхідно внести певні корективи в його реалізацію. З врахуванням необхідних технологічних змін та недоліків традиційних засобів глибокого розпушення були розроблені і перевірені нові за принципом дії, енергозберігаючі багатоярусні робочі органи. В загальному, робочий орган такого глибокорозпушувача складається з рами з несучими стояками, на яких закріплені ґрунторозробні елементи у вигляді спряження горизонтального ножа з увігнутою симетричною жолобоподібною ґрунторозпушувальною поверхнею змінної кривизни, через форму і параметри якої задається необхідна деформація, ступінь напруження, а, отже, і подрібнення розроблюваного шару ґрунту [2].

Необхідним є моделювання теоретичної структури розпушеного ґрунту для подальшого дослідження залежності водно-фізичних властивостей розпушеного ґрунту залежно від конструктивних і технологічних передумов.

Аналіз останніх досліджень. Давно існувало прагнення вивести властивості ґрунтового середовища з властивостей його будови, складу і розташування складових частин в просторі, тобто з ґрунтової структури. Перша модель структури ґрунту запропонована англійським дослідником Б. Кіном в 1933 р. [3; 4]. Питання моделювання ґрунтової структури актуальні по теперішній час. Однією з причин збереження цієї актуальності є проблема моделювання гістерезису функції вологоутримання ґрунтів – основної гідрофізичної характеристики [3].

Всі відомі моделі ґрунтової структури можуть бути в цілому розділені на дві групи. Моделі, що використовують методи повної подібності та моделі ґрунтової структури, засновані на неповній подібності – самоафінні. У першому випадку, бажаючи довести результати моделювання, до числових значень ґрунт розглядають, як більш-менш правильну щільну упаковку однакових (Сліхтер) або різнорозмірних куль (Мічурін [4]). Число ієрархічних рівнів таких моделей математично не обмежена і визначається лише наявністю ґрунтових елементів різного розміру. Від того наскільки щільно упаковані елементи моделі, розрізняють гексагональну чи кубічну укладку. Від типу укладання залежить величина інтегральної і диференціальної пористості такої моделі, а також форма ґрунтових пор [3].

Серед моделей структури, які використовують принцип подібності («упорядковані» моделі), відомі капілярні моделі. У капілярній моделі пористість суцільного ґрунтового тіла моделюється системою

пор – капілярів. Система капілярів може мати як завгодно складну будову, а самі капіляри мати різну форму від, форми капілярів залежить величина капілярних сил водоутримання такої моделі. Існують моделі, що комбінують і ускладнюють регулярні моделі ґрунтової структури. Загальним для регулярних моделей є те, що повністю виключається елемент випадковості, порушення порядку, хаотичності організації ґрунтових макроелементів і їх просторового розташування [3].

Порівняно недавно, з'явилися фрактальні моделі ґрунтової структури на основі узагальнення класичних фракталів – килима Серпінського або губки Менгера. Фрактальна геометрія не цікавиться формою елементів структури, її цікавить лише фрактальна розмірність і число ітерацій, що характеризує кількість ієрархічних рівнів розглянутої самоафінної безлічі. В реальності структура ґрунтів займає середнє положення між двома цими полюсами [3].

Методика досліджень. Теоретичні дослідження базувались на загальних положеннях механіки ґрунтів та математичних теорій щільної упаковки різнорозмірних структурних елементів середовища. Аналітично-графічний аналіз виконувався з допомогою ЕОМ з використанням прикладних програм із застосуванням методів статистичного опрацювання результатів досліджень.

Результати досліджень. Ґрунтову скибу, яка підлягає подрібненню, можна розглядати як однорідне за щільністю, суцільне середовище утворене сукупністю окремих структурних агрегатів зв'язаних між собою силами зчеплення [2].

Подрібнення ґрунтової скиби криволінійним робочим елементом ярусного глибокорозпушувача проходить в декілька етапів (стадій) [2; 5]. На кожному етапі, під дією нормальних зусиль реакції від поверхні робочого елемента, проходить руйнування відносно довгих (довжина більша висоти) або відносно коротких (довжина менша висоти) елементів ґрунтової скиби. Їх виникнення і руйнування відбувається по чергово. Відносно довгі елементи ґрунтової скиби поділяються навпіл, а відносно короткі розшаровуються по нейтральній лінії відповідно до деформаційних властивостей ґрунтового середовища. Подальші стадії горизонтальних розшарувань відбуваються в зоні розтягу постійно зменшуючи її висоту, а поточна висота зон стиску залишається без зменшення. Визначальними для кінцевої стадії подрібнення є висота ґрунтоагрегатів, які утворилися в зоні розтягу достаточного до поверхні робочого елемента шарі ґрунту (рис. 1).

Співвідношення розмірів суміжних по вертикалі частинок стру-

ктури залежить від відношення модулів пружності ґрунтового середовища на стиск та розтяг, який в свою чергу залежить від типу ґрунту та його вологості. Для суглинистих та супіщаних ґрунтів це співвідношення загалом знаходиться в межах 1...5 при вологості ґрунту 0...40% [6; 7] і апроксимуються лінійними залежностями.

За прийнятою схемою утворені ґрунтоагрегати є правильної прямокутної форми. Але можна логічно припустити, що в подальшому вершини таких ґрунтоагрегатів будуть все таки зруйновані за рахунок взаємодії ґрунтоагрегатів між собою і вони стануть наближено схожі на кулі різного розміру [8-13].

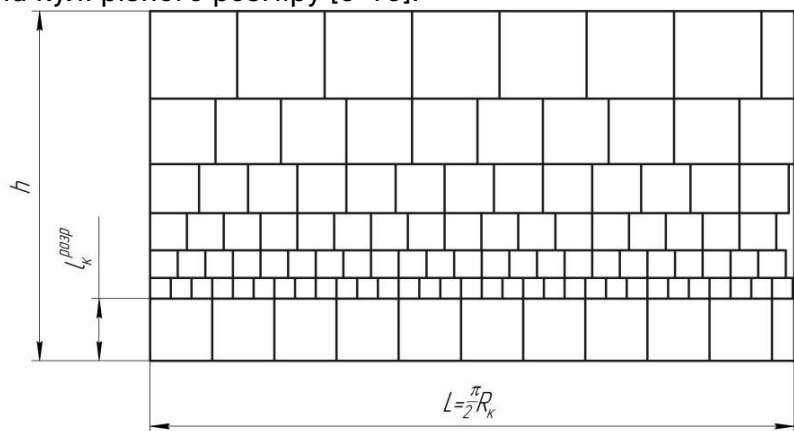


Рис. 1. Схема подрібнення ґрунтової скиби в поперечному перерізі криволінійним робочим елементом: h – висота ґрунтового шару в ярусі; L – ширина смуги ґрунтового шару в ярусі, що припадає на один робочий елемент; $l_{\text{розр}}$ – величина розрахункових ґрунтоагрегатів; R_k – радіус кінцевої кривизни робочого елемента глибокорозпушувача

Водно-фізичні властивості розпушеного за такою схемою ґрунту будуть визначатися об'ємом пор між різними за розміром структурних агрегатів суміжних шарів. Щільне взаємне розміщення структурних агрегатів у вигляді куль, центри яких утворюють правильні багатогранники, можливе за декількома варіантами.

Слід також зазначити, що не всі з правильних багатогранників, що розглядаються як просторові точкові решітки, задовольняють умові геометричної незмінюваності. Насправді тільки три з них, які мають трикутні розрізи (тетраедр, октаедр і ікосаедр), геометрично незмінні і статично визначені [9].

При вирішенні екстремальної задачі щодо найбільш щільної упаковки куль одиничного радіуса доводиться, що таке розташування може бути досягнуто, коли центри куль утворюють кубооктаедр

так, що кожна куля стосується 12 інших, а саме: шести – екваторіальних, трьох – нижнього шару і трьох – верхнього (рис. 2, а).

Кубооктаедр відноситься до сімейства рівнокутних напівправильних багатогранників і полярним перетворенням щодо описаної кулі перекладається в двоїстий йому рівногранний багатогранник – ромбододекаедр.

Можна також отримати інше компакте розташування куль, якщо центральну кулю розмістити таким чином, щоб інші 12 дотичних з нею куль з їх центрами на вершинах кубооктаедра зблизилися між собою в нинішньому просторі. При такій упаковці кубооктаедр перетвориться в ікосаедр (рис. 2, б), де куля стосується 12 інших, рівних їй куль, в вершинах вписаного ікосаедра.

Таким чином, кожна система центрів матеріальних куль в просторі розбиває його на опуклі багатогранники [14; 15; 16]. Центри суміжних куль будуть утворювати умовний тетраедр або октаедр, а шпарини між ними матимуть відповіді форми – тетраедричні або октаедричні. При кубооктаедрі з 14 шпарин: 6 – будуть октаедричними, а 8 – тетраедричними, при ікосаедрі всі 20 шпарин будуть тетраедричними. Можна припустити, що одна октаедрична шпарина буде приблизно рівна двом тетраедричним, тому за обома варіантами сумарний об'єм сукупності шпарин буде однаковий. Для спрощення розрахунків більш детально розглянемо другий варіант (рис. 2, б).

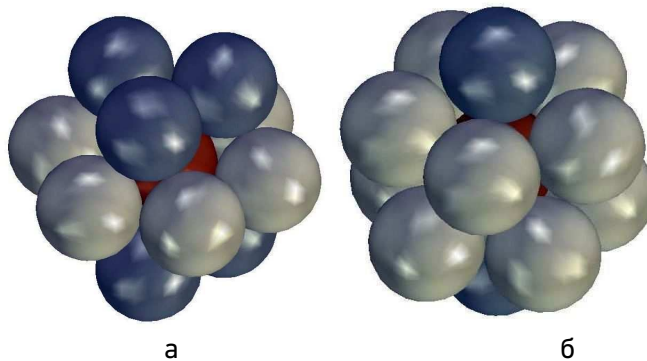


Рис. 2. Розміщення куль одиничного радіусу при їх найбільш щільній упаковці

Однією з основних характеристик розпушеного ґрунту є коефіцієнт розпушення, який можна визначити через співвідношення об'єму шпарин і ґрунтових елементів. Основою для розрахунку будуть слугувати залежності для тетраедра утвореного між центрами ґрунтових куль. При чому розміри радіусів куль у вершині тетраедра і в його основі будуть відрізнятися на величину відношення модулів

пружності ґрунтового середовища на стиск та розтяг (див. рис. 1).

Так як структура розміщення куль є симетричною відносно горизонтальної площини, для спрощення розрахунку розглянемо тільки верхню частину. Тоді біля центральної кулі знаходяться 5 тетраедричних шпарини між більшою кулею (радіусом R_1) у вершині та меншими (радіусом R) в основі тетраедра, а також 5 шпарин між такими ж кулями (радіусом R) в основі тетраедра та ще меншою (радіусом r) у вершині ($R_1 > R > r$). В розрахунку на кожен ґрунтову кулю припадає $1/4$ шпарини.

З визначення коефіцієнта розпушення можна записати:

$$k_p = \frac{V_{\kappa} + V_{\text{ш}}}{V_{\kappa}} = 1 + \frac{V_{\text{ш}}}{V_{\kappa}}; \quad (1)$$

де V_{κ} – об'єм ґрунтової півкулі, $V_{\kappa} = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi R^3$; $V_{\text{ш}}$ – об'єм шпарин в розрахунку на одну ґрунтову півкулю.

Об'єм шпарин в розрахунку на одну ґрунтову півкулю визначається з $1/4$ частини 10 об'ємів утворених суміжних тетраедрів двох видів за виключенням 4 секторів куль у вершинах кожного з них (рис. 3, а). В основі кожного з них лежить рівносторонній трикутник зі стороною $2R$. Кожен з вирізаних тетраедром пірамідальних секторів куль складається з правильної піраміди та сферичної частини (рис. 3, б).

Формули для визначення об'єму такого тіла не існує. Тому було проведено додаткові дослідження з просторовим моделюванням пірамідального сектора (рис. 3, б) в системі твердотілого параметричного моделювання T-Flex Cad (рис. 3, в) та апроксимацією отриманих результатів в Microsoft Excel. Визначено, що відношення об'єму сферичної частини пірамідального сектора до об'єму піраміди в його основі залежить від співвідношення довжин основи ($2R$) та ребер ($R+R_1$) тетраедра та в межах відношення модулів пружності ґрунтового середовища на стиск та розтяг $1...5$ (вологість $0...40\%$) дорівнює

$$0,55 \cdot \frac{R}{R_1} \sqrt{\frac{R}{R_1}}, \text{ при цьому похибка апроксимації не перевищує } 2\%.$$

Запишемо об'єм пірамідального сектора 4678 з вершиною 4 з кулі радіусом R_1 :

$$V_{R_1} = \frac{1}{3} S_{678} h_{49} \left(1 + 0,55 \frac{R}{R_1} \sqrt{\frac{R}{R_1}} \right) = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} m_{6,11} \cdot a_{678} \cdot h_{49} \left(1 + 0,55 \frac{R}{R_1} \sqrt{\frac{R}{R_1}} \right), \quad (2)$$

де S_{678} – площа рівностороннього трикутника з вершинами 6, 7, 8 в

основі піраміди; h_{49} – висота на основу 9 з вершини 4; $m_{6,11}$ – медіана рівностороннього трикутника 678 з вершини 6; a_{678} – сторона рівностороннього трикутника з вершинами 6, 7, 8.

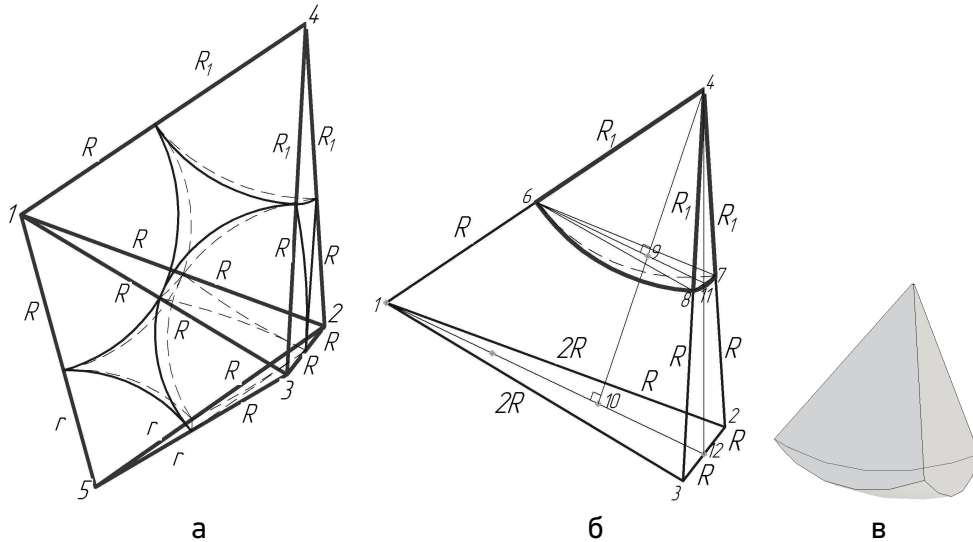


Рис. 3. Тетраедри між центрами ґрунтових куль:

а – два види тетраедрів між центрами п'яти куль трьох стадій подрібнення;
б – схема розрахунку об'єму пірамідального сектору, що вирізається;
в – моделювання пірамідального сектору в T-Flex Cad

З подібності рівнобедрених трикутників 1, 4, 12 та 6, 4, 11 визначаємо медіану $m_{6,11}$, з 1, 4, 3 та 6, 4, 8 – сторону a_{678} , а з прямокутного трикутника 6, 4, 9 – висоту h_{49} :

$$m_{6,11} = \frac{\sqrt{3}RR_1}{R+R_1}, \quad a_{678} = \frac{2RR_1}{R+R_1}, \quad h_{49} = \frac{R_1}{R+R_1} \sqrt{(R+R_1)^2 - \frac{4}{3}R^2}. \quad (3)$$

Тоді, після підстановки і перетворень, отримаємо:

$$V_{R_1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{RR_1}{R+R_1} \right)^3 \sqrt{\left(\frac{R_1}{R} + 1 \right)^2 - \frac{4}{3}} \left(1 + 0,55 \frac{R}{R_1} \sqrt{\frac{R}{R_1}} \right). \quad (4)$$

Об'єм пірамідального сектору з кулі радіусом r визначається аналогічно тільки з врахуванням зміни відношень сторін.:

$$V_r = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{Rr}{R+r} \right)^3 \sqrt{\left(\frac{r}{R} + 1 \right)^2 - \frac{4}{3}} \left(1 + 0,55 \frac{R}{r} \sqrt{\frac{R}{r}} \right). \quad (5)$$

Основи тетраедрів з вершинами в кулях радіусом R сполучають центри куль радіусами R_1 та r . В цих випадках рівносторонній трикутник в основі пірамідального сектора зміниться на рівнобедрений з врахуванням співвідношень R_1 до R та r до R , що вплине на розмір

медіани основи та висоти сектора. Зміною останньої величини можна знехтувати через її дуже малу значимість і розраховувати як і при рівносторонній основі.

Тоді запишемо:

$$V_{R(R_1)} = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{RR}{R+R} \right)^3 \operatorname{ctg} \left(\arcsin \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R}} \right) \sqrt{\left(\frac{R}{R} + 1 \right)^2} - \frac{4}{3} \left(1 + 0,55 \frac{R}{R} \sqrt{\frac{R}{R}} \right) =$$

$$= 0,1R^3 \operatorname{ctg} \left(\arcsin \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R}} \right)$$

$$V_{R(r)} = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{RR}{R+R} \right)^3 \operatorname{ctg} \left(\arcsin \frac{1}{1 + \frac{r}{R}} \right) \sqrt{\left(\frac{R}{R} + 1 \right)^2} - \frac{4}{3} \left(1 + 0,55 \frac{R}{R} \sqrt{\frac{R}{R}} \right) =$$

$$= 0,1R^3 \operatorname{ctg} \left(\arcsin \frac{1}{1 + \frac{r}{R}} \right)$$

Визначимо об'єм шпарини між трьома кулями радіусом R та кулею радіусом R_1 .

$$V_{3RR_1} = \frac{1}{3} S_{123} h_4 - 3V_{R(R_1)} - V_{R_1} =$$

$$= \frac{R^2}{\sqrt{3}} \sqrt{(R_1 + R)^2 - \frac{4}{3} R^2} - 3 \cdot 0,1R^3 \operatorname{ctg} \left(\arcsin \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R}} \right) -$$

$$- \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{RR_1}{R+R_1} \right)^3 \sqrt{\left(\frac{R_1}{R} + 1 \right)^2} - \frac{4}{3} \left(1 + 0,55 \frac{R}{R_1} \sqrt{\frac{R}{R_1}} \right) =$$

$$= \frac{R^3}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{\left(\frac{R_1}{R} + 1 \right)^2} - \frac{4}{3} - 0,52 \operatorname{ctg} \left(\arcsin \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R}} \right) - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{1}{\frac{R}{R_1} + 1} \right)^3 \sqrt{\left(\frac{R_1}{R} + 1 \right)^2} - \frac{4}{3} \left(1 + 0,55 \frac{R}{R_1} \sqrt{\frac{R}{R_1}} \right) \right], \quad (8)$$

де S_{123} – площа рівностороннього трикутника з вершинами 1, 2, 3 в основі тетраедра; h_4 – висота на основу з вершини 4.

За аналогією запишемо об'єм шпарини між трьома кулями радіусом R та кулею радіусом r :

$$V_{3Rr} = \frac{1}{3} S_{123} h_5 - 3V_{R(r)} - V_r =$$

$$= \frac{R^3}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{\left(\frac{r}{R} + 1\right)^2 - \frac{4}{3}} - 0,52 \operatorname{ctg}\left(\arcsin \frac{1}{1 + \frac{r}{R}}\right) - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{1}{\frac{r}{R} + 1}\right)^3 \sqrt{\left(\frac{r}{R} + 1\right)^2 - \frac{4}{3}} \left(1 + 0,55 \frac{R}{r} \sqrt{\frac{R}{r}}\right) \right]. \quad (9)$$

Враховуючи, що співвідношення між розмірами суміжних куль визначається схемою подрібнення на рис. 1, залежить від відношення модулів пружності ґрунтового середовища на стиск (E_c) та розтяг (E_p) і є сталим для всього масиву розпушеного ґрунту, то можна прийняти наступне:

$$\frac{R}{R_l} = \frac{r}{R} = \frac{l_{\kappa}^{(n+1)}}{l_{\kappa}^{(n)}} = \frac{E_c / E_p}{E_c / E_p + 1} = k_R, \quad (10)$$

де $l_{\kappa}^{(n)}$ та $l_{\kappa}^{(n+1)}$ – розміри утворених ґрунтоагрегатів на поточній та наступній стадії подрібнення.

Тоді (8), (9) запишуться наступним чином:

$$V_{3RR_l} = \frac{R^3}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{\left(\frac{1}{k_R} + 1\right)^2 - \frac{4}{3}} - 0,52 \operatorname{ctg}\left(\arcsin \frac{1}{1 + \frac{1}{k_R}}\right) - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{1}{k_R + 1}\right)^3 \sqrt{\left(\frac{1}{k_R} + 1\right)^2 - \frac{4}{3}} \left(1 + 0,55 k_R \sqrt{k_R}\right) \right], \quad (11)$$

$$V_{3Rr} = \frac{R^3}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{(k_R + 1)^2 - \frac{4}{3}} - 0,52 \operatorname{ctg}\left(\arcsin \frac{1}{1 + k_R}\right) - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{1}{\frac{1}{k_R} + 1}\right)^3 \sqrt{(k_R + 1)^2 - \frac{4}{3}} \left(1 + 0,55 \frac{1}{k_R \sqrt{k_R}}\right) \right]. \quad (12)$$

Об'єм шпарин в розрахунку на одну ґрунтову півкулю визначається як:

$$V_{uu} = \frac{5}{4} V_{3RR_l} + \frac{5}{4} V_{3Rr}. \quad (13)$$

Тоді для коефіцієнта розпушення запишемо:

$$k_p = 1 + \frac{\frac{5}{4}V_{3RR_1} + \frac{5}{4}V_{3RR_2}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3}\pi R^3} = 1 + \frac{15V_{3RR_1} + 15V_{3RR_2}}{8\pi R^3}. \quad (14)$$

Після підстановки (11), (12) у (14) отримаємо залежність $k_p=f(k_R)$ (15), а врахувавши (10) – залежність коефіцієнта розпушення від ґрунтових характеристик $k_p=f(E_c/E_p)$. Від цих же характеристик є залежним кінцевий радіус R_k криволінійного ґрунторозпушуючого елемента [2], що буде доречним показати на цьому ж графіку (рис. 4):

$$k_p = 1 + \frac{15}{8\sqrt{3}\pi} \left[\sqrt{\left(\frac{1}{k_R} + 1\right)^2 - \frac{4}{3}} - 0,52 \operatorname{ctg}\left(\arcsin \frac{1}{1 + \frac{1}{k_R}}\right) - \left(-\left(\frac{1}{k_R} + 1\right)^3 \sqrt{\left(\frac{1}{k_R} + 1\right)^2 - \frac{4}{3}} \left(1 + 0,55 k_R \sqrt{k_R}\right)\right) \right] + \frac{15}{8\sqrt{3}\pi} \left[\sqrt{(k_R + 1)^2 - \frac{4}{3}} - 0,52 \operatorname{ctg}\left(\arcsin \frac{1}{1 + k_R}\right) - \left(-\left(\frac{1}{k_R} + 1\right)^3 \sqrt{(k_R + 1)^2 - \frac{4}{3}} \left(1 + 0,55 \frac{1}{k_R \sqrt{k_R}}\right)\right) \right]. \quad (15)$$

З аналізу отриманої залежності (15) видно, що коефіцієнт розпушення залежить тільки співвідношення фізичних характеристик ґрунтового середовища, що є реальним і в дійсності. При необхідності, для спрощення розрахунків, можна використати достатньо точну апроксимаційну залежність 5-го порядку (точність апроксимації 0,9997).

$$k_p = 0,0005k_R^5 - 0,009k_R^4 + 0,0619k_R^3 - 0,2133k_R^2 + 0,378 k_R + 0,9909. \quad (16)$$

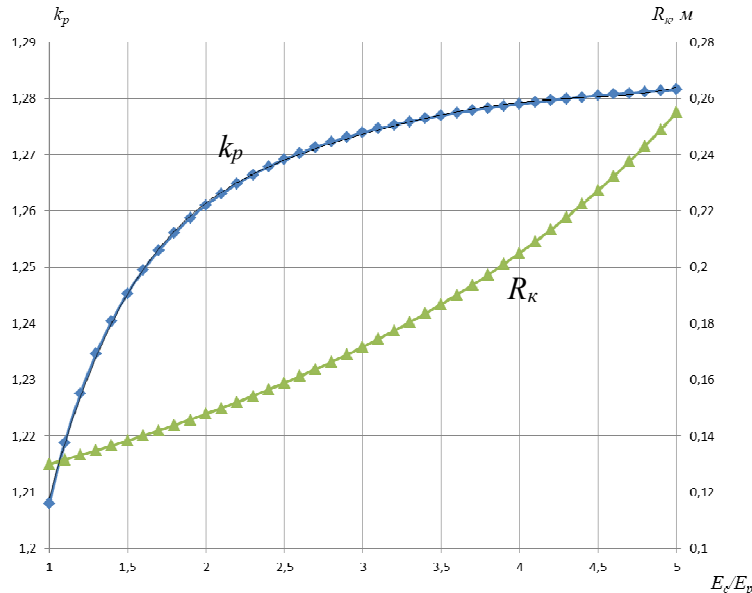


Рис. 4. Графічні залежності коефіцієнта розпушення та кінцевого радіуса криволінійного ґрунторозпушуючого елемента від ґрунтових характеристик

Висновки. Як видно з графічної залежності $k_p=f(E_c/E_p)$ (рис. 4) зміна коефіцієнта розпушення має різну інтенсивність на всьому діапазоні досліджень. Після $E_c/E_p=2,0\dots2,5$ він зростає менш інтенсивно ніж наростає вологість ґрунту, в цих умовах, при перезволоженні, необхідними будуть додаткові заходи водовідведення. До цієї зони інтенсивне зростання коефіцієнта розпушення створює сприятливі умови для повного акумулювання надлишкової вологи в ґрунті. Більш точно точку різкої зміни інтенсивності коефіцієнта розпушення можна визначити знайшовши похідну функцію від (15) або (16) та порівнявши її до одиниці.

1. Lukianchuk O. P., Turcheniuk V. O., Prykhodko N. V., Volk P. P., Rokochinskiy A. M. Necessity and possible approaches to applying deep loosening when cultivating rice. (Необхідність та можливі підходи до застосування глибокого розпушення при вирощуванні рису) INMATEH – agricultural engineering, VOL. 57, NO. 1 / 2019, 199-206 pp. 2. Ткачук В. Ф., Лук'янчук О. П., Рижий О. П. Агромеліоративні багатоярусні глибокорозпушувачі : монографія. Рівне, 2011. 190 с. ISBN 978-966-327-167-5. 3. Моисеев К. Г., Гончаров В. Д. Оценка модели почвенной структуры в фильтрационных исследованиях. XLII Неделя науки СПбПУ. Возобновляемые виды энергии и установки на их основе : научно-практическая конференция, Россия, Санкт-Петербург, 2013. 4. Мичурин Б. Н. Энергетика почвенной влаги. Л. : Гидрометеиздат, 1975, 140 с. 5. Лук'янчук О. П. Аналіз критеріїв якості та енергоємності структур-

ного розпушення ґрунтів. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Вип. 1 (61). Рівне : НУВГП, 2013. 172–182 с. **6.** Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов : учеб. пособие для строительных вузов. М. : Высш. шк., 1978. 447 с. **7.** Крамаренко В. В. Грунтоведение : учебник для академического бакалавриата. М. : Издательство Юрайт, 2018. 430 с. ISBN 978-5-534-01339-9. **8.** Аулін В. В., Тихий А. А. Модель взаємодії дисперсного середовища ґрунту з поверхнею робочих органів ґрунтообробних та землерийних машин. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2014. Вип. 27. 140–149 с. **9.** Taguchi I., Kurashige M., Imai K. Effect of cubic container's wall or floor on random packing structures of spherical particles. *JSME. Intern. J. Ser. A*. 2006. V. 49, № 2. P. 265–272. **10.** Ковалев О. Б., Ковалева И. О. Моделирование случайной упаковки насыпного слоя полидисперсных сферических частиц. *Прикладная механика и техническая физика*. 2014. Т. 55, № 4. **11.** Corwin E. I., Clusel M., Siemens O. N., et al. Model for random packing of polydisperse frictionless. *Soft Matter*. 2010. № 6. P. 2945–2959. **12.** Yang R. Y., Zou R. P., Yu A. B. Effect of material properties on the packing of fine particles. *J. Appl. Phys.* 2003. V. 94, № 5. P. 3025–3034. **13.** Yang R. Y., Zou R. P., Yu A. B. Pore structure of the packing of fine particles. *J. Colloid Interface Sci.* 2006. V. 299. P. 719–725. **14.** Власюк Ю. Н., Нелюбова О. В. К вопросу о пористости сыпучей среды. *Вестник Приазовского государственного технического университета* : сб. науч. трудов ПГТУ. Мариуполь, 1995. Вип. 1. С. 217–219. **15.** Журавлев А. А., Вержбовский Г. Б., Еременко Н. Н. Пространственные деревянные конструкции. Ростовский государственный строительный университет. Ростов-на-Дону. 2003. 518 с. ISBN 5-8456-0487-7. **16.** Дик И. Г., Дьяченко Е. Н., Миньков Л. Л. Моделирование случайной упаковки шаров. *Физ. мезомеханика*. 2006. Т. 9, № 4. С. 63–69.

REFERENCES:

1. Lukianchuk O. P., Turcheniuk V. O., Prykhodko N. V., Volk P. P., Rokochinskiy A. M. Necessity and possible approaches to applying deep loosening when cultivating rice. (Neobkhdnist ta mozhlyvi pidkhody do zastosuvannia hlybokoho rozpushennia pry vyroshchuvanni rysu) INMATEH – agricultural engineering, VOL. 57, NO. 1 / 2019, 199–206 rr. **2.** Tkachuk V. F., Lukianchuk O. P., Ryzhyi O. P. Ahromeliatoryvni bahatoiarusni hlybokorozpushuvachi : monohrafiia. Rivne, 2011. 190 s. ISBN 978-966-327-167-5. **3.** Moiseev K. H., Honcharov V. D. Otsenka modely pochvennoi struktury v filtratsionnykh issledovaniakh. *XLII Nedelia nauki SPbPU. Vozobnovliaemye vidy enerhii i ustanovki na ikh osnove* : nauchno-prakticheskaia konferentsiia, Rossiia, Sankt-Peterburh, 2013. **4.** Michurin B. N. Enerhetika pochvennoi vlazi. L. : Hidrometeoizdat, 1975, 140 s. **5.** Lukianchuk O. P. Analiz kryteriiv yakosti ta enerhoiemnosti strukturnoho rozpushennia gruntiv. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky* : zb. nauk. prats. Vyp. 1 (61). Rivne : NUVHP, 2013. 172–182 s. **6.** Vialov S. S. Reolohicheskie osnovy mekhaniki hruntov : ucheb. posobie dlia

stroitelnykh vuzov. M. : Vyssh. shk., 1978. 447 s. **7.** Kramarenko V. V. Hruntovedenie : uchebnik dlia akademicheskoho bakalavriata. M. : Izdatelstvo Yurait, 2018. 430 s. ISBN 978-5-534-01339-9. **8.** Aulin V. V., Tykhyi A. A. Model vzaємodii dyspersnoho seredovyshcha gruntu z poverkhnei robochykh orhaniv gruntoobrobnykh ta zemleryinykh mashyn. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*. 2014. Vyp. 27. 140-149 s. **9.** Taguchi I., Kurashige M., Imai K. Effect of cubic containers wall or floor on random packing structures of spherical particles. *JSME. Intern. J. Ser. A*. 2006. V. 49, № 2. P. 265–272. **10.** Kovalev O. B., Kovaleva I. O. Modelirovanie sluchainoi upakovki nasypnoho sloia polidispersnykh sfericheskikh chastits. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskai fizika*. 2014. T. 55, № 4. **11.** Corwin E. I., Clusel M., Siemens O. N., et al. Model for ransom packing of polydisperse frictionless. *Soft Matter*. 2010. № 6. P. 2945–2959. **12.** Yang R. Y., Zou R. P., Yu A. B. Effect of material properties on the packing of fine particles. *J. Appl. Phys.* 2003. V. 94, № 5. P. 3025–3034. **13.** Yang R. Y., Zou R. P., Yu A. B. Pore structure of the packing of fine particles. *J. Colloid Interface Sci.* 2006. V. 299. P. 719–725. **14.** Vlasiuk Yu. N., Neliubova O. V. K voprosu o poristosti sypuchei sredy. *Vestnik Priazovskoho hosudarstvennoho tekhnicheskoho universiteta : sb. nauch. trudov PHTU. Mariupol*, 1995. Vyp. 1. S. 217–219. **15.** Zhuravlev A. A., Verzhbovskii H. B., Eremenko N. N. Prostranstvennye dereviannye konstruksii. Rostovskii hosudarstvennyi stroitelnyi universitet. Rostov-na-Donu. 2003. 518 s. ISBN 5-8456-0487-7. **16.** Dik I. H., Diachenko E. N., Minkov L. L. Modelirovanie sluchainoi upakovki sharov. *Fiz. mezomekhanika*. 2006. T. 9, № 4. S. 63–69.

Lukianchuk O. P., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

MODELING OF THE LOOSENEED SOIL STRUCTURE AFTER EXPOSURE TO A CURVED WORKING ELEMENT OF THE LONGLINE DEEP-RIPPER

The issue of rational use of water and land resources of reclaimed land determines the need to create a low-energy way of differentiating the degree of soil drainage. There has long been a desire to derive the properties of the soil environment from the properties of its structure, composition and arrangement of constituent parts in space, that is, from the soil structure.

The necessity of modeling the theoretical structure of loosened soil for the further study of changes in its water-physical properties is determined. Analyzed possible options for the formation of soil macronutrients after loosening. The choice of the most rational model

after the impact of a curved surface is justified. Theoretical studies of the dependence of the water-physical properties of loosened soil depending on the design and technological prerequisites were carried out.

Theoretical studies were based on general provisions of soil mechanics and mathematical theories of dense packing of structural particles of the medium. An analytical and graphical analysis was performed using a computer using application software with the use of methods for statistical processing of research results.

The analysis of the obtained dependence shows that the loosening factor depends only on the ratio of the physical characteristics of the soil environment, which is real and in reality. As can be seen from the graphical dependence, the variation of the loosening coefficient has different intensities throughout the study range. After some value, it increases less intensively than the soil moisture increases, under these conditions, additional water drainage measures will be required under watering. To this zone, the intense growth of the loosening ratio creates favorable conditions for the complete accumulation of excess moisture in the soil.

Keywords: soil structure, loosening, model, macro element.

Лукьянчук А. П., к.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ РАЗРЫХЛЕННОЙ ПОЧВЫ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫМ РАБОЧИМ ЭЛЕМЕНТОМ МНОГОЯРУСНОГО ГЛУБОКОРАЗРЫХЛИТЕЛЯ

Определена необходимость моделирования теоретической структуры разрыхленной почвы для дальнейшего исследования изменения ее водно-физических свойств. Проанализированы возможные варианты моделей формирования макроэлементов почвы после разрыхления. Обоснован выбор наиболее рациональной модели после воздействия криволинейной поверхности. Проведены теоретические исследования зависимости водно-физических свойств разрыхленной почвы в зависимости от конструктивных и технологических предпосылок.

Ключевые слова: структура почвы, разрыхление, модель, макроэлемент.