

УДК 631.372

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

АНАЛІЗ КРИТЕРІЇВ ЯКОСТІ ТА ЕНЕРГОЄМНОСТІ СТРУКТУРНОГО РОЗПУШЕННЯ ҐРУНТІВ

Проаналізовано вибір критеріїв якості для структурного розпушення та викладено теоретичні дослідження його енергоємності за гіпотезою Ребіндера.

Ключові слова: ґрунт, структура, критерії якості, енергоємність.

У багатьох виробничих і дослідницьких ситуаціях часто виникає необхідність визначити якість і енергоємність розпушення ґрунту.

Якість розпушення ґрунту – поняття комплексне, яке характеризує міру наближення дійсних кількісних показників фізичного стану розпушеного ґрунту до відповідних нормативних (або рекомендованих) кількісних показників, визначених галузевими вимогами.

За галузевою ознакою розпушення ґрунтів буває будівельним, меліоративним і сільськогосподарським. Природно, що вимоги до якості розпушення ґрунтів у кожній галузі специфічні і пов'язані з призначенням розпушення. В той же час, існує група показників, що характеризують ефективність розпушення безвідносно до галузевих вимог. Це коефіцієнти розпушення k_p , структурності k_c і повноти розпушення k_n .

За А.М. Зелениним [1], розпушуваність ґрунтів характеризується коефіцієнтом розпушення k_p , який визначається відношенням об'єму розпушеного ґрунту (V_p) до об'єму того ж ґрунту, який він займав у природному заляганні (V).

Середні значення k_p лежать в межах 1,08...1,35, а коефіцієнт залишкового розпушення у межах 1,01... 1,09 [1]. Менші значення відповідають піщаним ґрунтам, більші – глинистим. З часом розпушений ґрунт «злежується», ущільнюється і зберігає тільки залишкову розпушеність.

Повнота розпушення характеризується коефіцієнтом повноти розпушення k_n , який є відношенням площі розпушеного ґрунту у поперечному перерізі смуги захвату робочих органів розпушувача (F_p) до суми площ розпушеного і нерозпушеного ґрунту у цьому ж поперечному перерізі (F_p+F_n) [2].

Коефіцієнти k_p та k_n не відображають величини утворюваних структурних ґрунтових агрегатів і це є суттєвим недоліком. Тому для кількісної оцінки структури ґрунту користуються характеристикою структурного складу ґрунту [3], якою є *коефіцієнт структурності* k_c – відношення за масою кількості ґрунтових агрегатів "цінних" розмірів C до сумарної маси агрегатів інших розмірів B .

У цьому випадку, чим більше k_c , тим кращою вважається структура ґрунту. Але оцінка ґрунту буде неадекватною при наявності значної кількості великих ґрунтових скиб, оскільки коефіцієнт структурності не враховує співвідношення кількості і розмірів ґрунтових агрегатів.

У найбільшій мірі вимоги до розпушення ґрунтів деталізовані в області меліорації і сільського господарства. Це пояснюється тим, що фізичні властивості розпушеного ґрунту опосередковано через водноповітряний, тепловий та інші режими визначають врожайність сільськогосподарських культур. До цих властивостей належать, насамперед: *щільність, твердість, шпаруватість і структура* ґрунту.

Накопичений досвід свідчить, що для кожної сільськогосподарської культури існує комплекс "оптимальних" значень властивостей, які гарантують максимальну врожайність.

В агрономічному відношенні дуже вагоме значення має структура ґрунту. Н.А. Качинський визначав як агрономічно цінну структуру агрегати ґрунту розмірами від 1 до 10 мм [6].

За розмірами структурні агрегати розподіляються на мікроструктурні (<0,25 мм), макроструктурні (0,25-10 мм) і мегаструктурні або глибисті (>10 мм) [6]. Відповідно до ОСТ 70.2.15-73 структурні агрегати за розмірами поділяються на декілька типів: глибиста структура – агрегати розміром >10 мм; грудкувата – 10...3 мм; зерниста – 3...0,25 мм.

Сукупність структурних агрегатів утворюють *зерновий склад* ґрунту. Зерновим складом ґрунту називають відносний вміст за масою частинок сухого ґрунту різної величини, яка виражена у відсотках до загальної маси сухого ґрунту [7].

Нова методика оцінки структурності ґрунту була запропонована кафедрою сільськогосподарських машин Дніпропетровського державного аграрного університету (ДДАУ) [8]. Пропонується оцінювати якість обробки ґрунту за *ступенем подрібнення ґрунту і та коефіцієнтом різнозернистості* $k_{зep}$.

Показники структурності i та $k_{зep}$ визначаються методом електронного сканування зображення чи поверхні ґрунтового зрізу з наступною їхньою обробкою на ЕОМ. Після проходу ґрунтообробного агрегату в оброблений ґрунтовий профіль занурюють металеву рамку 1 таким чином, щоб рівень денної поверхні 2 був у межах скляного вікна

3 (рис. 1). Далі, з однієї сторони рамки розкривають дно борозни. Позитивним є те, що при цьому структура профілю не порушується, і показники структури ґрунту після розпушення об'єктивно відбиваються у результатах вимірювання.

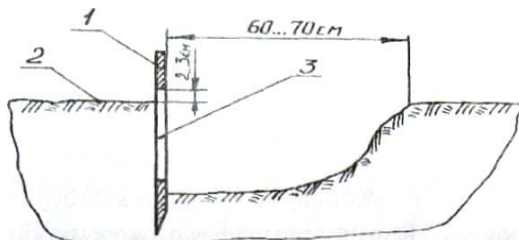


Рис. 1. Схема підготовки ґрунтового профілю до сканування:
1 – металева рамка; 2 – донна поверхня; 3 – скляне вікно

Ступінь подрібнення ґрунту i характеризує розміри агрегатів, які утворюються після проходу розпушувача. Він являє собою відношення середньо статистичних розмірів структурних агрегатів до (D_n) і після обробітку (D_k). При цьому D_n являє собою умовний теоретичний показник, який залежить від глибини обробітку ґрунту h , ширини захоплення b , приведеного коефіцієнта довжини шару k_L , що залежить від довжини лінії відколу шару. Для відомих знарядь для основного обробітку ґрунту і глибин $0,2 < h < 0,4$ можна прийняти $k_L = 1$ м.

$$i = \frac{\sqrt[3]{hbk_L}}{D_k}$$

Ступінь подрібнення i для отримання структурних агрегатів 2...10 мм повинен становити 200...2000 [5].

Коефіцієнт різнозернистості структурних агрегатів ($k_{зep}$) характеризує розкид розмірів агрегатів і визначається він як відношення середніх діаметрів агрегатів, що складають 60% (D_{60}) та 10% (D_{10}) маси ґрунтового об'єму

$$k_{зep} = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Теоретично оптимальне значення $k_{зep} \rightarrow 1$ при $2 < D_{60} < 10$ мм. У реальних умовах бажаним значенням буде $k_{зep} = 9...16$, хоча прийнятним значенням варто вважати значення $k_{зep} = 10...70$ [8, 9]. Збільшення значення $k_{зep}$ свідчить про одночасний ріст у розпушеному шарі загальної кількості структурних агрегатів малого і великого діаметрів, тобто агрегатний склад стає більш неоднорідним.

Загалом, оптимальні нормативні параметри обробленого ґрунтового шару для агрокультур визначаються агротехнічними вимогами [7], узагальнені показники яких є наступними:

- вміст грудок розміром до 5 мм – не менше 75% [10];
- структура ґрунту для посіву повинна бути дрібнокомкватою з перевагою грудок діаметром 1(3)... 10 мм [3, 8];
- вміст грудок розміром 1 ...25 мм – не менше 80% [3, 8];
- вміст грудок розміром до 50 мм – 70-90% [10];
- склад верхнього шару (0-5 см) з агрегатів 10-20 мм [11];
- вміст агрегатів >1 мм >50% [10, 12], агрегати розміром менше 1 мм вважаються ерозійно небезпечними [10];
- щільність поверхневого шару – 1,2-1,3 г/см³ [11] (для попередження непродуктивного випаровування вологи);
- щільність верхніх кореневмісних шарів над насінням 0,9...1,0 г/см³;
- щільність кореневмісних шарів 1,2 г/см³ [13];
- щільність ґрунту нижче насінного ложа до 1,1 ...1,3 г/см³ [11];
- об'єм повітряних шпар (шпаруватість) 70% [14];
- висота гребенів на поверхні поля – до 3...4 см [7];
- твердість ґрунту – до 30 кг/см²;
- водопроникність – понад 30 мм/год;
- коефіцієнт фільтрації повинен складати 5... 10 л/добу;
- тиск рушіїв на ґрунт нормується ГОСТ 26955-86 [12];
- питома енергоємність процесу – до 33-35 кВт/м ширини захвату [7].

Таким чином, методика визначення якості розпушення ґрунтів – недосконала і потребує проведення подальших досліджень з метою встановлення як загальних, так і галузевих визначальних показників (критеріїв) якості розпушення, методики їх отримання і обробки результатів дослідів.

При структурному розпушенні ґрунту (сільськогосподарському, меліоративному) потрібно скорегувати лише його макроструктуру без руйнування структурних ґрунтоагрегатів.

Процес глибокого агромеліоративного розпушення ґрунтів доцільно проводити багатоярусним робочим органом [15]. В його параметрах є можливість максимально врахувати диференціацію вимог до якості обробітку орного та підорних шарів. Основним робочим елементом такого багатоярусного глибокорозпушувача є криволінійна ґрунторозпушувальна поверхня [15]. Через форму і параметри цієї поверхні задається необхідна якість подрібнення розроблюваного шару ґрунту.

В ґрунтозахисній технології обробітку ґрунту робочі органи з криволінійними формами робочих поверхонь широко використовуються. Як свідчать різнопланові дослідження форм поверхонь та їх профілів, зокрема дослідження Павлова А.В., Корабельського В.І., Павлоцького А.С., Ветохіна В.І., Кравчука В.І. та багатьох інших, криволінійні форми робочих поверхонь спроможні розпушувати ґрунт з малими енерговитратами. Робочі органи з криволінійною поверхнею діють на ґрунт поступовим згином в одній або декількох координатних площинах [8, 16].

Вагомим показником якості та енергоємності роботи таких робочих органів є коефіцієнт подрібнення розробленого ґрунту [8]. Показники якості та енергоємності прямо залежать від співвідношення розмірів і кількості утворених структурних ґрунтоагрегатів.

Коефіцієнт подрібнення всього об'єму буде пропорційний кратності подрібнення поперечного перерізу ґрунтової скиби, що розпушується робочим елементом, яка може бути визначена як відношення початкової площі поперечного перерізу ґрунтової скиби S до площі поперечного перерізу утвореного усередненого ґрунтоагрегату S_k

$$K_n = \frac{S}{S_k}.$$

Для визначення кратності подрібнення через технологічні параметри прийємо припущення, що утворені усереднені ґрунтоагрегати є правильної квадратної форми як найбільш стійкої до подальшого руйнування подрібненням. Можна також припустити, що в подальшому вершини таких ґрунтоагрегатів будуть все таки зруйновані за рахунок взаємодії ґрунтоагрегатів між собою і вони стануть наближено схожі на реальні.

Якщо це припущення правильне, то тоді можна записати

$$K_n = \frac{S}{S_k} = \frac{h \cdot L}{l_{k\text{сер}}^2},$$

де h , L – відповідно висота і ширина поперечного перерізу ґрунтової скиби; $l_{k\text{сер}}$ – лінійний розмір усередненого ґрунтоагрегату.

Виходячи з того, що при такому розпушенні утворюються ґрунтоагрегати різного розміру, найбільш достовірною для аналізу енергоємності процесу структурного розпушення ґрунту є гіпотеза П.А. Ребіндера, яка об'єднує в собі дві попередні взаємодоповнюючі гіпотези: поверхневу і об'ємну [8].

За цією гіпотезою, робота, яка затрачається на подрібнення, у загальному випадку дорівнює сумі двох доданків:

$$A = K_1 \cdot S_n^V + K_2 \cdot V.$$

Перший член даного виразу являє собою енергію, що витрачається на утворення нових поверхонь площею S_n^V при подрібненні твердого тіла об'ємом V . Другий член рівняння виражає енергію деформації тіла об'ємом V , K_1 і K_2 – експериментальні коефіцієнти пропорційності, методика визначення яких на даний час є відсутньою, що є недоліком для застосування цієї гіпотези [8].

Однак ці коефіцієнти потрібні лише при визначенні кількісних значень роботи і енергоємності структурного розпушення ґрунту та можуть бути предметом подальших досліджень. Для якісної оцінки достатньо проаналізувати величини S_n^V та V , які можна визначити теоретично через параметри робочого органу.

Перш за все необхідно визначити і математично описати порядок та механізм подрібнення поперечного перерізу ґрунтової скиби.

Відомими є твердження, що дослідження згину ґрунтової скиби можна розглядати як згин ґрунтової балки з використанням положень опору матеріалів. При цьому необхідно врахувати двовірність ґрунтового середовища та циклічний характер подрібнення ґрунту, з поступовим руйнуванням більших агрегатів призматичної форми на менші.

Особливістю деформування ґрунту згином є різний опір стиску та розтягу. Відношення модулів пружності на стиск та розтяг – $E_c/E_p = 2,5 \dots 4,1$ [17]. Уявна нейтральна лінія ґрунтової балки при її згині зміщується в зону стиску, внаслідок чого до 62-83% ґрунту в поперечному перерізі працює на розтяг. Це є значною перевагою робочих органів, де переважними є деформації згину і розтягу.

Ґрунтову скибу, яка підлягає подрібненню, можна розглядати як однорідне за щільністю, суцільне середовище утворене сукупністю окремих структурних агрегатів зв'язаних між собою силами зчеплення [8].

За попередніми експериментальними дослідженнями визначено зону початку подрібнення ґрунтової скиби згином (поява перших тріщин) [15]. В більшості випадків ця зона знаходиться на нейтральній лінії початкового поперечного перерізу ґрунтової скиби (рис. 2). Зростання інтенсивності подрібнення проходить в напрямку до поверхні. Шари ґрунту, які контактують з поверхнею, приймаються за розрахункові.

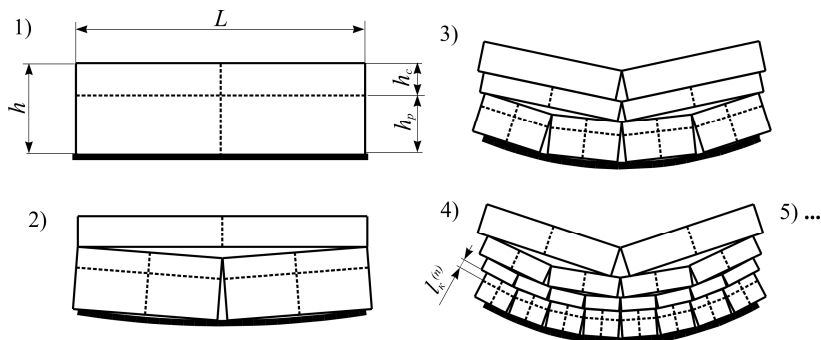


Рис. 2. Стадії подрібнення ґрунтової скиби згином

Для математичного опису прийнятої схеми послідовності подрібнення ґрунту розглядається зміна величини ґрунтоагрегатів в поперечній площині скиби.

Згідно прийнятої схеми, інтенсивність подрібнення зростає в напрямі до поверхні. Незмінною на наступній стадії подрібнення лишається висота ґрунтоагрегатів, які утворилися в зоні стиску.

Для прийнятої схему послідовності подрібнення ґрунту можна записати:

$$\begin{cases} \frac{h_p}{h_c} = k_h; \\ h_p + h_c = h. \end{cases}$$

Тут, k_h – величина відношення висоти зони розтягу до висоти зони стиску при згині ґрунтової скиби, h_p , h_c – відповідно, величини висоти зони розтягу та зони стиску при згині ґрунтової скиби, h – висота ґрунтової скиби, яка визначається глибиною розробки в конкретному ярусі.

Висоту зони стиску на поточній стадії подрібнення можна виразити через величину висоти зони розриву на попередній стадії подрібнення:

$$h_c^{(n)} = \frac{h_p^{(n)}}{k_h}, \quad h_p^{(n)} = h_p^{(n-1)} - h_c^{(n)},$$

де n – кількість циклів горизонтальних розшарувань, $n=1, 2, \dots, n_{\max}$; здійснивши нескладні перетворення, отримаємо:

$$h_c^{(n)} = \frac{h_p^{(n-1)}}{k_h + 1}, \quad h_p^{(n-1)} = \frac{k_h \cdot h_p^{(n-2)}}{k_h + 1}, \dots$$

Тоді, величина ґрунтоагрегатів, які утворюються на поточній стадії

подрібнення, визначиться наступним чином:

$$l_{\kappa}^{(n)} = \frac{h \cdot k_h^{n-1}}{(k_h + 1)^n},$$

де $l_{\kappa}^{(n)}$ – величина структурних агрегатів, які утворюються при n -ій стадії подрібнення ґрунтового шару поверхню;

Кількість структурних агрегатів визначається відношенням ширини поверхні до отриманої величини структурних агрегатів.

Структура ґрунту після подрібнення визначається кількістю стадій, а їх кількість, в свою чергу, величиною кривизни поверхні. Максимальна кількість стадій подрібнення n_{\max} визначається утворенням в зоні розриву ґрунтоагрегатів розрахункових розмірів.

З урахуванням опису зміну величини ґрунтоагрегатів в зоні стиску, величина розрахункового ґрунтоагрегату в зоні розриву наступним чином:

$$l_{\kappa}^{(n_{\max})} = \frac{l_{\kappa}^{\text{розр}}}{k_h}.$$

Для визначення максимально необхідної кількості стадій подрібнення здійснимо деякі перетворення:

$$\frac{l_{\kappa}^{\text{розр}}}{k_h \cdot h} = \frac{1}{k_h} \left(\frac{k_h}{k_h + 1} \right)^{n_{\max}}.$$

Взявши натуральний логарифм від правої і лівої частин, отримаємо:

$$\ln \left(\frac{l_{\kappa}^{\text{розр}}}{h} \right) = \ln \left(\frac{k_h}{k_h + 1} \right)^{n_{\max}}, \quad \rightarrow \quad n_{\max} = \frac{\ln(l_{\kappa}^{\text{розр}}) - \ln h}{\ln k_h - \ln(k_h + 1)}.$$

Величина розрахункового ґрунтоагрегату залежить від величини кінцевого радіуса поперечної кривизни ґрунторозпушувальної поверхні R_{κ} [15]

$$l_{\kappa}^{\text{розр}} = \frac{2\varepsilon_p R_{\kappa}}{1 - 2\varepsilon_p}.$$

Тоді, максимально необхідна кількість стадій подрібнення

$$n_{\max} = \frac{\ln \left(\frac{2\varepsilon_p R_{\kappa}}{h(1 - 2\varepsilon_p)} \right)}{\ln \frac{k_h}{k_h + 1}}.$$

За попередньою оцінкою величини максимально необхідної кількості стадій подрібнення за раціональними значеннями реальних робочих органів визначено, що її значення знаходиться в межах 10-15.

Маючи згадувані параметри після статистичних підрахунків, можна оцінити теоретичну структуру ґрунту та визначити ступінь його розпушеності.

Величини глибини розробки в кожному з ярусів h та кінцевого радіуса R_k є визначальними також при визначенні всіх основних конструкційних та технологічних параметрів робочого органа ярусного глибокорозпушувача, а також його ефективності [15].

Вихідні дані для розрахунків вибираємо для усередненого типу ґрунту: $k_n = 3,5$; $\varepsilon_p = 0,015$; $L = a = 235$ мм; $h = 100, 150, 200$ мм; $R_k = 150, 200, 250$ мм [15].

Структуру розпушеного ґрунту для глибокого розпушення оцінюємо кількістю ґрунтоагрегатів наступних величин: <5 мм, 5-10 мм, 10-25 мм, 25-50 мм, >50 мм. Вказані величини обумовлені згадуванням їх в агротехнічних вимогах при оцінці якості меліоративного та сільськогосподарського розпушення [7].

Величина усередненого ґрунтоагрегату визначалася наступним чином:

$$l_k^{сеп} = \sqrt{\frac{\sum S_k}{\sum i}}$$

де S_k – площа поперечного перерізу ґрунтоагрегата на n -ій стадії подрібнення, мм²; i – кількість ґрунтоагрегатів на n -ій стадії подрібнення, шт.

Чисельним дослідженням одержаних математичних залежностей отримано вплив глибини розробки в кожному з ярусів h та кінцевого радіуса R_k ґрунторозпушувальних поверхонь на кратність подрібнення розпушеного ґрунту та сумарної площі поверхонь утворених нових ґрунтоагрегатів (таблиця) та побудовані їх графічні залежності (рис. 3).

Таблиця

Результати дослідження структури подрібнення ґрунтової скиби

h , мм	R_k , мм	$l_k^{сеп}$, мм	Кратність подрібнення перерізу, K_n	Площа новоутворених поверхонь в об'ємі подрібнення, S_n^V , м ²
100	150	4,86	996	4,639
	200	5,54	766	4,308
	250	6,32	588	3,976

продовження таблиці

150	150	5,63	1113	5,302
	200	7,29	664	4,639
	250	7,29	664	4,639
200	150	6,60	1079	5,633
	200	7,50	835	5,302
	250	8,53	645	4,970

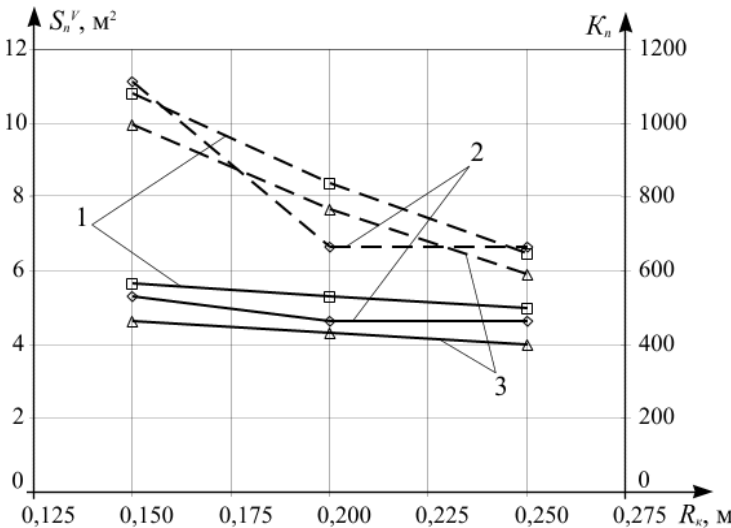


Рис. 3. Залежність величини кратності подрібнення перерізу K_n (---) та сумарної площі новоутворених поверхонь в об'ємі подрібнення, S_n^V (—) від кінцевого радіуса R_k при різній глибині розробки h : 1 – $h=0,20$ м; 2 – $h=0,15$ м; 3 – $h=0,10$ м

Як видно з наведених графічних залежностей (див. рис. 3), енергоємність процесу структурного розпушення є пропорційною до кратності подрібнення, що виглядає логічним явищем і певною мірою підтверджує адекватність запропонованої математичної моделі. Крім цього, зростання цих двох величин пропорційне зменшенню величини радіуса вихідного перерізу ґрунторозпушувальної поверхні, що також є логічним. Залежність їх від товщини стружки не є однозначною через різну кількість стадій подрібнення і специфіку механізму подрібнення на кожній з них.

Порівняння структури ґрунту, отриманої за математичною моделлю та визначеною експериментально (фотографічним способом), дає розбіжність результатів на рівні 10-15%.

За подібною методикою, при необхідності, можна оцінити роботу на подрібнення ґрунтового середовища та інших машин, робочі органи яких мають кривизну робочої поверхні.

1. Зеленин А. Н. Лабораторный практикум по резанию ґрунтов : учебное пособие для студентов инженерно-строительных и автомобильно-дорожных ВУЗов / А. Н. Зеленин, Г. Н. Карасев, Л. В. Красильников. – М. : Высш. шк., 1960.
2. Черненко В. Я. Глубокое рыхление осушаемых тяжелых почв / В. Я. Черненко, Ш. И. Брусиловский. – М. : Колос, 1983.
3. Ревут И. Б. Физика почв / И. Б. Ревут. – Л., 1964.
4. Ревут И. Б. Структура и плотность почвы – основные параметры, кондиционирующие почвенные условия жизни растений / И. Б. Ревут, Н. А. Соколовская, А. М. Васильев // Пути регулирования почвенных условий жизни растений. – Л. : Гидрометиздат, 1971.
5. Качинский Н. А. Оценка основных физических свойств почв в агрономических целях и природного плодородия их по механическому составу / Н. А. Качинский // Почвоведение. – 1958.
6. Качинский Н. А. Структура почвы (итоги и перспективы изучения вопроса) / Н. А. Качинский. – М. : Изд-во МГУ, 1963.
7. Орманджи К. С. Контроль качества полевых работ : справочник / К. С. Орманджи. – М. : Росагропромиздат, 1991. – 191 с.
8. Панченко А. Н. Теория измельчения почв почвообрабатывающими орудиями / А. Н. Панченко. – Днепропетровск : ДГАУ, 1999. – 140 с.
9. Волик Б. А. Методика оценки качества обработки почвы / Волик Б. А., Колбасин А. А., Хотюн Г. В. // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. – 2002. – № 1.
10. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин / П. М. Заїка. – Харків : Око, 2001. – Ч. 1. Машини та знаряддя для обробітку ґрунту.
11. Медведев В. В. Использование агрофизических свойств черноземов при разработке почвообрабатывающих машин / Медведев В. В., Слободюк П. И., Пашенко В. Ф.
12. Власенко В. М. Экологические требования к почвообрабатывающим орудиям и посевным машинам / В. М. Власенко // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1993. – № 9.
13. Лысенко М. П. Состав и физико-механические свойства ґрунтов / М. П. Лысенко. – М. : Недра, 1980.
14. Коршиков А. А. Глубокое рыхление почвы – надежный прибор накопления влаги / А. А. Коршиков, А. А. Михайлин // Земледелие. – 2000. – № 5.
15. Ткачук В. Ф. Агромеліоративні багатоярусні глибкорозпушувачі : монографія / Ткачук В. Ф., Лук'яничук О. П., Рижий О. П. – Рівне : НУВГП, 2011. – 190 с.
16. Гуков Я. С. Проблемы обробітку ґрунту і шляхи їх розв'язання / Я. С. Гуков // Вісник аграрної науки: науково-теоретичний журнал УААН. – 1996. – № 1. – С. 28-30.
17. Вялов С. С. Реологические основы механики ґрунтов : учеб. пособие для строительных вузов / С. С. Вялов. – М. : Высш. шк., 1978. – 447 с.

Рецензент: д.т.н., професор Кравець С. В. (НУВГП)