

Житомирський національний агроекологічний університет

## **НАПРУЖЕНИЙ СТАН ҐРУНТУ І ПРОЦЕСИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ПРИ ОБРОБІТКУ ДИСКОВИМИ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ**

*Збереження родючості ґрунту є одним з основних завдань сільськогосподарського виробництва. Важливим фактором родючості ґрунту є його оптимальна структура. В умовах інтенсифікації сільськогосподарського виробництва під дією ґрунтообробних знарядь та ходових частин мобільної техніки відбувається руйнування структури ґрунту, зменшення кількості агрономічно цінних водотривких агрегатів, розпорошення*

---

© С. М. Кухарець, П. М. Забродський

грунту. Розглянуто процес структуроутворення, фактори, які на нього впливають і проаналізовані енергетичні критерії утворення водотривкої структури. Вивчені особливості, які виникають при механічному обробітку ґрунту, вплив обробітку на його структуру і особливості напружено-деформованого стану ґрунту. Розроблена математична модель, яка дозволяє розрахувати напружений стан ґрунту і проектувати найбільш раціональну форму дискових робочих органів.

**Ключові слова:** структура, агрегат, обробіток, напруження, параметри.

### **Постановка проблеми**

Збереження родючості ґрунту є одним з основних завдань сільськогосподарського виробництва. Родючість ґрунту забезпечується при наявності в ньому достатньої кількості агрономічно цінних водотривких агрегатів. Механічний обробіток ґрунту повинен забезпечити шар, що обробляється, оптимальне розпушування для забезпечення сприятливого водного, повітряного, теплового та харчового режимів зростання сільськогосподарських культур. Але при цьому механічний обробіток призводить до руйнування структури ґрунту, посилення мінералізації органічних речовин, порушення повітряного і водного балансів при обробці пересушених або перезволожених ґрунтів [10, 12]. В умовах малозв'язних мінеральних дерново-підзолистих ґрунтів Полісся України, водотривкі ґрунтові агрегати, які легко руйнуються при механічному обробітку, важливо, щоб при механічному обробітку в ґрунті створювався такий напружений стан, який забезпечував би мінімальне руйнування агрономічно-цінних водотривких агрегатів.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Вивченню структурно-механічних властивостей ґрунтів і агрономічно-цінних водотривких агрегатів присвячена велика кількість робіт таких вчених: Гольдштейн, Воронін, Шеїн, Качинський, Мілановський та інші. Але, в той же час, механізми контактної взаємодії частинок в агрегатах ґрунтів, які визначають закономірності їх функціонування і утворення, сам механізм утворення агрегатів різної форми і розмірів вивчені недостатньо. Первинним актом структуроутворення є виникнення контакту поміж сусідніми частинками дисперсної фази, а кінцевий результат являє собою виникнення просторової структури, яка охоплює весь ґрунтовий профіль. Кількість і характер контактів є найважливішими структурними характеристиками агрономічно цінних водотривких агрегатів. Розрізняють три основних типи поміжчастинкових контактів. Це коагуляційні рідинні контакти, сухі точкові (молекулярно-точкові) і конденсаційні (кристалізаційно-цементатійні), або фазові контакти. В утворенні ґрунтових агрегатів беруть участь всі три типи контактів. Поряд із вказаними в ґрунтах утворюються специфічні цементатійно-фазові контакти. Вони пов'язують між собою органомінеральні фракції мікроагрегатів, неагреговані

пилові і піщані частинки ґрунтів і формують з них водостійкі ядра, які є основною функціональною одиницею агрегатної структури ґрунтів.

У процесі механічного обробітку ґрунту одночасно відбуваються два процеси – руйнування структури ґрунту і структуроутворення. У залежності від того, який процес переважає, відбувається або розпорошення ґрунту, що може призвести до підсилення його деградації, або, навпаки, його агроструктура поліпшується і, відповідно, підвищується родючість. Як показують дослідження [13], під впливом механічних напружень, які утворюються в ґрунті при механічному обробітку ґрунтообробними знаряддями, відбувається руйнування водостійкого каркасу, утвореного шляхом зчеплення один з одним високодисперсних органо-глинистих частинок. Цей каркас пов'язує, армує водостійкі агреговані частинки в агрегатах ґрунтів і визначає їх водостійкість.

### **Мета, завдання та методика досліджень**

Мета і завдання даного дослідження – розглянути процеси структуроутворення агрономічно цінних водотривких агрегатів, умови, при яких вони утворюються, напружений стан, який виникає в зоні контакту робочого органу з ґрунтом, і запропонувати математичну модель, яка дозволяє розрахувати напружений стан ґрунту, з метою удосконалення конструкції дискових робочих органів з вирізами. Методологічною основою досліджень є методи і прийоми діалектичного пізнання досліджуваної проблеми, методологічні та теоретичні положення класичної механіки, механіки твердого тіла, колоїдної хімії та інших галузей науки.

### **Результати досліджень**

Процес руйнування водостійкого каркасу супроводжується вивільненням з нього агрегованих водостійких часток різного розміру. Дана закономірність, що характеризує розподіл зруйнованих водостійких частинок по фракціях, виявлена в агрегатах ґрунтів різного генезису, що мають глинистий, важкосуглинистий, середньосуглинистий і супіщаний гранулометричний склад, тобто характерна для різних типів ґрунтів [13]. Після руйнування ґрунтових структур для їх поновлення частинки ґрунту необхідно наблизити одна до одної на таку відстань, щоб подолати потенційний енергетичний бар'єр [1]. У природніх умовах подолання цього енергетичного бар'єру і утворення водотривких агрегатів ґрунту відбувається завдяки процесам гідратації і дегідратації, промерзання і відтанення ґрунту. При цьому, в ґрунті створюється такий напружений стан, завдяки якому частинки ґрунту зміщуються, зближуються на необхідну відстань і, при якому виникають найбільш сприятливі умови для електростатичної взаємодії гумусових кислот з бічними сколами глинистих частинок і утворенням водотривких агрегатів ґрунту з урахуванням того, що при цьому відбувається розкриття мікроагрегатів глинистих частинок.

Оцінка здатності різних типів ґрунтів до утворення водотривких агрегатів на основі енергетичних критеріїв була вивчена К. Ю. Ханом і приводиться в табл. 1.

Таблиця 1. Енергетичні критерії, що характеризують умови утворення водотривкої структури – каркаса в мікроагрегатах ґрунту

Ґрунти	Гумус, %	P <sub>c</sub> , кПа	D = 0,2 мкм	
				$U(h_0)$ , мДж/м <sup>2</sup>
Світло-сірі лісові	3,4	9,956	1,35	4,3
Сірі лісові	4,5	14,205	1,53	4,9
Темно-сірі	7,8	18,363	1,72	5,5
Чорноземи типові	8,4	18,469	1,74	5,5

У цих дослідженнях величина визначалася на підставі експериментальних даних, що характеризують тривалу міцність структури водостійких агрегатів. Величина  $U_c$  характеризує ту критичну глибину первинного мінімуму, за якої коагуляція термодинамічно не вигідна. У дисперсній системі при  $U(h_0) < U_c$  встановлюється рівновага між процесами пептизації і коагуляції. Критичне значення енергії міжмолекулярного притягування  $U_c$  при  $h = h_0$  для частинок з  $r = 0,1$  мкм,

дорівнювала 0,7 мДж/м<sup>2</sup>. Воно значно менше величини  $U(h_0)$ , визначеної в досліджених ґрунтах (табл. 1).

Механічний обробіток ґрунту, особливо якщо він виконується без урахування особливостей конкретного ґрунту, призводить до руйнування агрономічно-цінних водотривких агрегатів і поступової деградації ґрунту. Як показують дослідження М. І. Картамишева [12], механічний обробіток, покращуючи агрофізичні властивості у період його застосування, забезпечуючи успіх землеробця у вигляді додаткового врожаю в рік застосування інтенсивного обробітку, має дуже серйозні негативні наслідки, накопичуючись які приводять до деградації ґрунту. Чим більше і частіше ми обробляємо ґрунт, чим частіше поглиблюємо і «окультурюємо» обробітком орний шар, тим «ефективніше» руйнуємо ґрунт, сприяємо його деградації. Це підтверджується і дослідженнями [9], які показали, що при застосуванні полицевого обробітку по всіх досліджуваних шарах (0–10, 10–20 та 20–30 см) відмічено погіршення структурного стану ґрунту та зниження кількості агрономічно цінних агрегатів до 5 % (табл. 2).

Таблиця 2. Вміст агрономічно цінних агрегатів після сухого просіювання, %

Обробіток	Шар ґрунту, см	Середнє значення, %
No-till	0–10	77,6
	10–20	80,9
	20–30	81,3
Традиційний	0–10	69,4
	10–20	72,5
	20–30	76,9

Таким чином, механічний обробіток ґрунту повинен проводитися з урахуванням типу ґрунту, його властивостей, так, щоб при механічному обробітку в ґрунті створювався такий напружений стан, який забезпечував би мінімальне руйнування агрономічно-цінних водотривких агрегатів. Особливо це стосується дерново-підзолистих ґрунтів Полісся України, водотривкі ґрунтові агрегати яких легко руйнуються за механічного обробітку. Для вивчення ґрунту як об'єкту механічного впливу робочих органів ґрунтообробних машин розроблено багато різних моделей ґрунту (Іванов, Кандауров, Мічурін та інші). Ці моделі, в основному, можна представити у вигляді двох груп: модернізованого суцільного і дискретного середовищ. У першому випадку поведінка моделі підпорядковується законам механіки суцільного середовища, а в другому – залучаються закони теорії ймовірностей і вона підпорядковується законам статистичної механіки. Заслужує на увагу модель, яку запропонував В. П. Дьяков [5]. У цій моделі ґрунт розглядається як природне дисперсне тіло, яке складається з окремих мілких і наймілкіших мінеральних частинок, що не зв'язані між собою, або зв'язані так, що міцність зв'язків у багато разів менша міцності матеріалу самих частинок. Зовнішнє навантаження при цьому сприймається в ґрунті твердими мінеральними частинками і передається від одної частинки до іншої через точки їх контакту.

У своїх дослідженнях М. О. Цитович показав [14], що за тиску штамп на ґрунтовий напівпростір, в останньому під штампом виникає ущільнене жорстке ядро, яке має форму клина. Таке саме ущільнене ядро утворюється і за обробітку ґрунту ґрунтообробними знаряддями. Це підтверджується і дослідженнями, проведеними іншими вченими. Форму і розміри цього ядра можна зафіксувати при раптовій зупинці ґрунтообробного знаряддя [9]. До того ж, це явище виникає як за глибокої обробки ґрунту, наприклад чизельними плугами чи глибокорозпушувачами (рис. 1), так і за поверхневого обробітку дисковими робочими органами [4], (рис. 2).



*Рис. 1. Вигляд ущільненого ядра на робочій поверхні глибокорозпушувача*



*Рис. 2. Вигляд ущільненого ядра на робочій поверхні дискового робочого органу*

Таким чином, у ґрунті виникають дві зони деформацій і, відповідно, дві зони напружень – зона ґрунту в стані пластичності і зона ґрунту в стані крихкого руйнування. Робочою поверхнею ґрунтообробного знаряддя після утворення ущільненого ядра стає не поверхня робочого органу, а поверхня ущільненого ядра [3]. Процес формування цієї поверхні може бути розцінений як процес авторегулювання і прояв зворотного зв'язку в системі. При формуванні ущільненого ядра, тertia ґрунт-метал замінюється більш енергомістким тертям ґрунт-ґрунт. Утворення двох зон в ґрунті з різним напружено-деформованим станом відповідає загальним закономірностям деформації при взаємодії тіл. Всередині ядра передбачається наявність гідростатичного напруженого стану. Тобто, тіло з ущільненого ґрунту передає тиск  $q$  гідростатичним чином, тобто рівномірно на всі боки.

В залежності від типу ґрунтообробного знаряддя і виду прикладеного навантаження деформування і руйнування ґрунту може відбуватися за такими схемами: відрив, коли тріщини розходяться одна відносно одної; поперечний зсув, коли поверхні тріщини ковзають одна по одній у поперечному напрямку; поздовжній зсув, коли поверхні тріщини ковзають одна по одній у поздовжньому напрямку. Максимально можливий рівень утворення агроцінних структурних формувань можливий за умов деформування структури напруженнями відриву, що відповідає схемі 1. При обробі ґрунту дисковими робочими органами реалізується схема 3, яка, в класичному варіанті, хоча й не сприяє утворенню агрегатних формувань, але й не призводить до значного їх руйнування. Це підтверджується результатами проведених досліджень [6, 8]. У той же час, напружений стан ґрунту можна змінювати, змінюючи геометричні параметри ґрунтообробних знарядь, швидкість їх руху, кути постановки дисків до напрямку руху і до вертикалі. Таким чином, змінюються і умови структуроутворення, що показують результати дослідження А. М. Семенюти [11]. Так, було встановлено, що при використанні дискових плугів у широкому діапазоні зміни кутів  $\alpha$  та  $\beta$  кількість грудок з приведеним діаметром 150 мм та вище є стабільною на рівні 14–15% за масою, але при збільшенні кута  $\beta > 200$  практично удвоє зменшується. При  $\beta > 200$  також на 30–40% збільшується кількість агрономічно цінних агрегатів.

Як показують проведені розрахунки, при обробі ґрунту дисковими знаряддями з вирізами в ґрунті виникає складний напружений стан з числом зон контактних навантажень рівних числу працюючих виступів. Розроблена математична модель, яка дозволяє розрахувати напружений стан ґрунту в залежності від відстані між виступами і величини навантаження  $G$  :

$$\begin{aligned}\sigma_x &= -\frac{G}{\pi} \left\{ \frac{x^3}{[x^2 + (y-a)^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{x^3}{[x^2 + (y+a)^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} \\ \sigma_y &= -\frac{G}{\pi} \left\{ \frac{x(y-a)^2}{[x^2 + (y-a)^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{x(y+a)^2}{[x^2 + (y+a)^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} \\ \tau_{xy} &= -\frac{G}{\pi} \left\{ \frac{x^2(y-a)}{[x^2 + (y-a)^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{x^2(y+a)}{[x^2 + (y+a)^2]^{\frac{3}{2}}} \right\}\end{aligned}$$

Згідно з дослідженнями А. С. Кушнар'ова [7] напруження і деформації ґрунту залежать від геометрії робочого органу. Тому розроблена математична модель дозволяє дослідити вплив геометричних параметрів робочого органу на напружений стан ґрунту і спроектувати найбільш раціональну форму дискових робочих органів з вирізами.

### Висновки та перспективи подальших досліджень

У процесі механічного обробітку ґрунту необхідно створити в Ґруні такий напружений стан, при якому баланс між процесами руйнування структури ґрунту і структуроутворення зміщується у бік структуроутворення. Розроблена математична модель дозволяє спроектувати найбільш раціональну форму дискових робочих органів з вирізами.

### Література

1. Вадюнина А. Ф. Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина – М. : Агропромиздат, 1986. – 416 с.
2. Ветохін В. І. Фізичні аспекти прояву зворотного зв'язку та авторегулювання форми знаряддя в системі «знаряддя-ґрунт» / В. І. Ветохін // Зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2009. – Вип. 22. – С. 119–124.
3. Ветохин В. И. К теории почвообрабатывающего клина / В. И. Ветохин // Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин : міжвід. наук.-техн. зб. / КНТУ. – 2011. – Вип. 41, ч. 1. – С. 301–308.
4. Гайфуллин Г. З. Исследование взаимодействия дисковых рабочих органов с почвой / Г. З. Гайфуллин, А. А. Курач, М. А. Амантаев // Материалы ЛІ міжнарод. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2013. – Ч. IV. – С. 17–23.
5. Дьяков В. П. Обоснование механической и энергетической моделей деформации и потери сплошности почвы / В. П. Дьяков // Материалы Всероссийской. науч.-практ. конф. «Сохранение и воспроизводство плодородия почв в адаптивно-ландшафтном земледелии» (13–15 сент. 2011 г.) / ГНУ ВНИИЗиЗПЭ РАСХН. – Курск, 2007. – С. 147–157.
6. Кухарець С. М. Кінематична модель ротаційного ґрунтообробного знаряддя / С. М. Кухарець, Б. А. Шелудченко, П. М. Забродський // Вісник ДАУ. – 2002. – № 1. – С. 133–137.
7. Кушнарєв А. С. Механико-технологические основы обработки почвы / А. С. Кушнарєв, В. И. Кочев. – К. : Урожай, 1989. – 140 с.
8. Моделювання параметрів роботи ротаційних робочих органів ґрунтообробних знарядь / С. М. Кухарець, Ю. Б. Бродський, С. В. Бушма, В. В. Кухарець // Вісник ДАУ. – 2006. – № 2 (17). – С. 224–232.
9. Одарченко О. М. Вплив полицевого і «нульового» обробітків на структуру ґрунту в полі ячменю ярого правобережного лісостепу України / О. М. Одарченко, С. П. Танчик // Агробіологія. – 2016. – № 1. – С. 36–41.
10. Панов И. М. Физические основы механики почв / И. М. Панов, В. И. Ветохин. – К. : Феникс, 2008. – 266 с.



11. Семенюта А. М. Польові дослідження дискового плуга в умовах півдня України / А. М. Семенюта // Зб. наук. пр. Вінницького нац. аграр. ун-ту. – 2012. – № 11, т. 2. – С. 260–264.

12. Механическая обработка и агрофизические свойства почвы / В. Ю. Тимонов, Н. М. Чернышева, С. С. Балабанов, Н. И. Картамышев // Вестн. Курской гос. с.-х. акад. – 2009. – № 6. – С. 53–57.

13. Хан К. Ю. Энергетическая характеристика водоустойчивости почвенных агрегатов : автореф. дис. на соискание учен. степени доктора биол. наук : спец. 06.01.03 «Агрофизика» / К. Ю. Хан. – Пушино, 2012. – 54 с.

14. Цытович Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. – М. : ГИЛСАСМ, 1963. – 636 с.

---