

# МАШИНОВИКОРИСТАННЯ В РОСЛИННИЦТВІ

УДК 519.87:631.333.4

## ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ҐРУНТУ ПІД ЧАС ВНЕСЕННЯ РІДКИХ БІОДОБРІВ ПЛОСКОРІЖУЧИМ ЗНАРЯДДЯМ

М. М. Чернявський, аспірант, Вінницький національний аграрний університет

Важливим фактором якісного підґрунтового внесення рідких добрив є їх достатнє закриття за рахунок переміщення ґрунту під впливом дії знаряддя. Дана стаття присвячена дослідженню теоретичних складових цього процесу. Для операції внесення рідкого біодобрива в ґрунт було обрано плоскоріжуче стрілчасте знаряддя, оскільки воно забезпечує найкраще розміщення добрива. Робота даного знаряддя досліджувалась при глибині обробки 100 мм на швидкостях 5, 7,5 і 10 км/год. Вихідні дані для розробки моделі переміщення ґрунту такі: властивості ґрунту, глибина обробки, швидкість обробки і параметри знаряддя. Основними параметрами для опису перерізу ґрунту були використані висота гребня, відстань між гребнями, глибина борозни і ширина переміщення ґрунту. Розроблена в результаті дослідження математична модель переміщення ґрунту показує, що даний процес залежить від робочої ширини знаряддя, кута розпушення, глибини і швидкості обробки. Порівняння розрахованих і вимірених значень свідчить, що максимальна відносна похибка становить 16%.

**Ключові слова:** переріз ґрунту, підґрунтове внесення, стрілчасте знаряддя, математична модель, параметри знаряддя, теоретична залежність.

**Вступ.** Внутрішньоґрунтове внесення добрив є однією із важливих складових успішного вирощування сільськогосподарських культур. А біодобриво в умовах екологічно чистого ведення рослинництва є безперечно лідером. Саме внесенню біодобрив у ґрунт надається перевага, оскільки таким чином забезпечується краще засвоєння і збереження поживних речовин, що там містяться. Проте такий процес потребує складніших машин, механізмів, робочих органів ніж поверхневе внесення і тому заслуговує на поглиблене дослідження і вивчення.

Внесення біодобрив під ґрунт здійснюється під дією механічного впливу на поверхню ґрунту, внаслідок чого він розпушується. Процес руйнування та руху часток ґрунту складний і є таким, що залежить від багатьох факторів. Важливо знати, як ці фактори впливають і до чого призводять, оскільки базуючись на цих знаннях можна добиватись потрібного ефекту від здійснення підґрунтового внесення. Оскільки відомо, що має бути забезпечена потрібна глибина внесення, площа, достатнє присипання і при цьому дотримана висока продуктивність операції, що залежить від швидкості виконання [1].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Вчені, дослідники, що займаються вивченням процесу обробки ґрунту акцентують свою увагу на формуванні борозни та гребенів, розповсюдженні ґрунту, впливові на ці показники та їх параметри умов та змінних величин під час виконання операції [1, 2]. Зарубіжними науковцями встановлено, що важливими факторами у формуванні геометрії обробленого ґрунту є форма та ширина знаряддя, кут розпушення, глибина обробки, фізико механічні властивості та вологість ґрунту. Результати їх досліджень свідчать, що руйнування структури ґрунту, переміщення і

перемішування його часток збільшуються зі збільшенням швидкості обробки [2-5]. Великий кут розпушення забезпечує формування високих гребенів. Такі та інші дані досить важливі для розробки фізичних основ математичних моделей і для опису перерізу ґрунту після обробки.

**Метою статті** є дослідження перерізу ґрунту після його обробки знаряддям для внесення рідких біодобрив та вплив параметрів операції на його формування, складення математичних залежностей на основі отриманих даних. Ці залежності можуть допомогти в розробці нових конструкцій знарядь.

**Виклад основного матеріалу.** В якості знаряддя для дослідження було обрано стрілчасту лапу шириною захвату 325 мм із трубопроводом для подачі добрив (Рис. 1). Проте подача добрив під час виконання експерименту не здійснювалась.



Рис. 1. Стрілчаста лапа для внесення добрив

Розрахунок перерізу ґрунту здійснювався в декартових координатах тому форма стрілчатої

лапи була спрощена до форми тетраедра ( $ABCG$ ), який є симетричним відносно осі  $x$  (Рис. 2). Нижня частина знаряддя ( $ABG$ ) розташована в площині  $xy$ ; початок координат розміщується в центрі знаряддя, вертикальна площина являється заднім краєм знаряддя. Кут розпушення лапи позначено  $\alpha$ , а кут бічного нахилу крила позначено

$\xi$ . Вісь  $x$  представляє собою напрямку руху знаряддя вперед, вісь  $y$  уявляє собою бічний напрямку ґрунту, вісь  $z$  - вертикальний напрям. Траєкторія проковзування ґрунту проходить з точки  $D$  на передньому краю знаряддя до заднього краю, і закінчується в точці  $P$ . Ширина знаряддя позначається  $w$ .

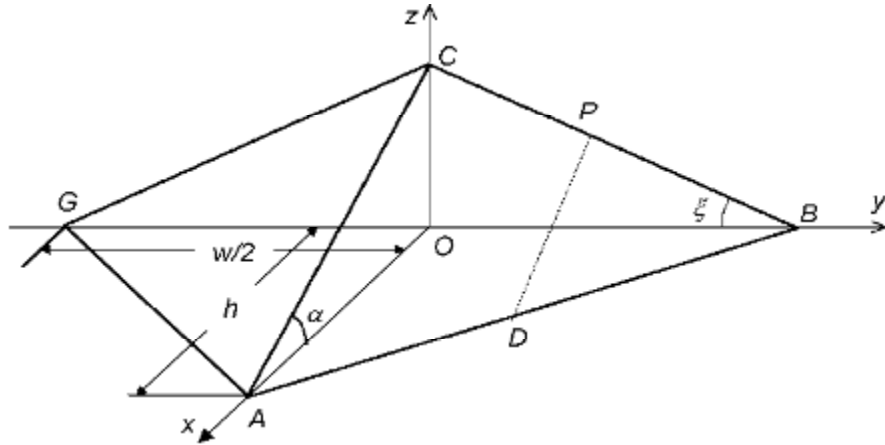


Рис. 2. Спрощена форма знаряддя в декартових координатах

Якщо припустити, що профіль гребня утвореного під час проходження стрілоподібного знаряддя має форму рівнобедреного трикутника ( $A_1TA_2$ ), то переріз ґрунту можна було б зобразити так, як показано на рис. 3. Де середнє бічне переміщення

ґрунту позначене індексом  $b_0$ . Точка  $S$  пов'язана з центральною точкою правого крила стрілоподібного знаряддя. Точка  $D$  є серединою бічного переміщення ґрунту.

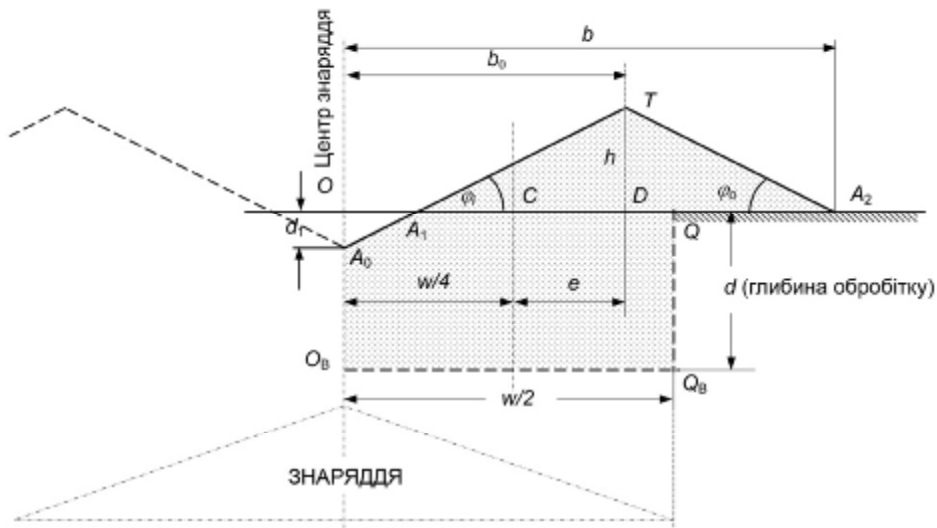


Рис. 3. Геометричні параметри перерізу ґрунту після обробки стрілоподібним знаряддям ( $d$  - глибина обробки;  $w$  - ширина знаряддя;  $e$  - бічне переміщення ґрунту)

Переріз ґрунту описується такими параметрами: відстань між гребнями ( $2b_0$ ), висота гребня ( $h$ ), ширина переміщення ґрунту ( $2b$ ), глибина борозни ( $d_1$ ) і кут гребня ( $\varphi = \varphi_1 = \varphi_0$ ). Кут гребня припускається не змінним. Таким чином ми допускаємо, що зображений гребінь аборівнобедрений трикутник буде "переміщатись" на більшу відстань із збільшенням швидкості обробки ґрунту, а висота гребня буде змінюватись прямо пропорційно глибині борозни.

Для дослідження було обрано три швидкості обробки ґрунту 5, 7,5 і 10 км/год. Глибина обробки підтримувалася на постійному рівні 100 мм для всіх проходів. Об'ємна щільність ґрунту була  $1280 \text{ кг/м}^3$ , а вміст вологи 12%.

Переріз ґрунту після п'яти повторень на трьох швидкостях показано на рис. 4. Результати аналізу свідчать, що ґрунт переміщується далше при збільшенні швидкості обробки ґрунту, а висота гребня дещо зменшується, але незначно.

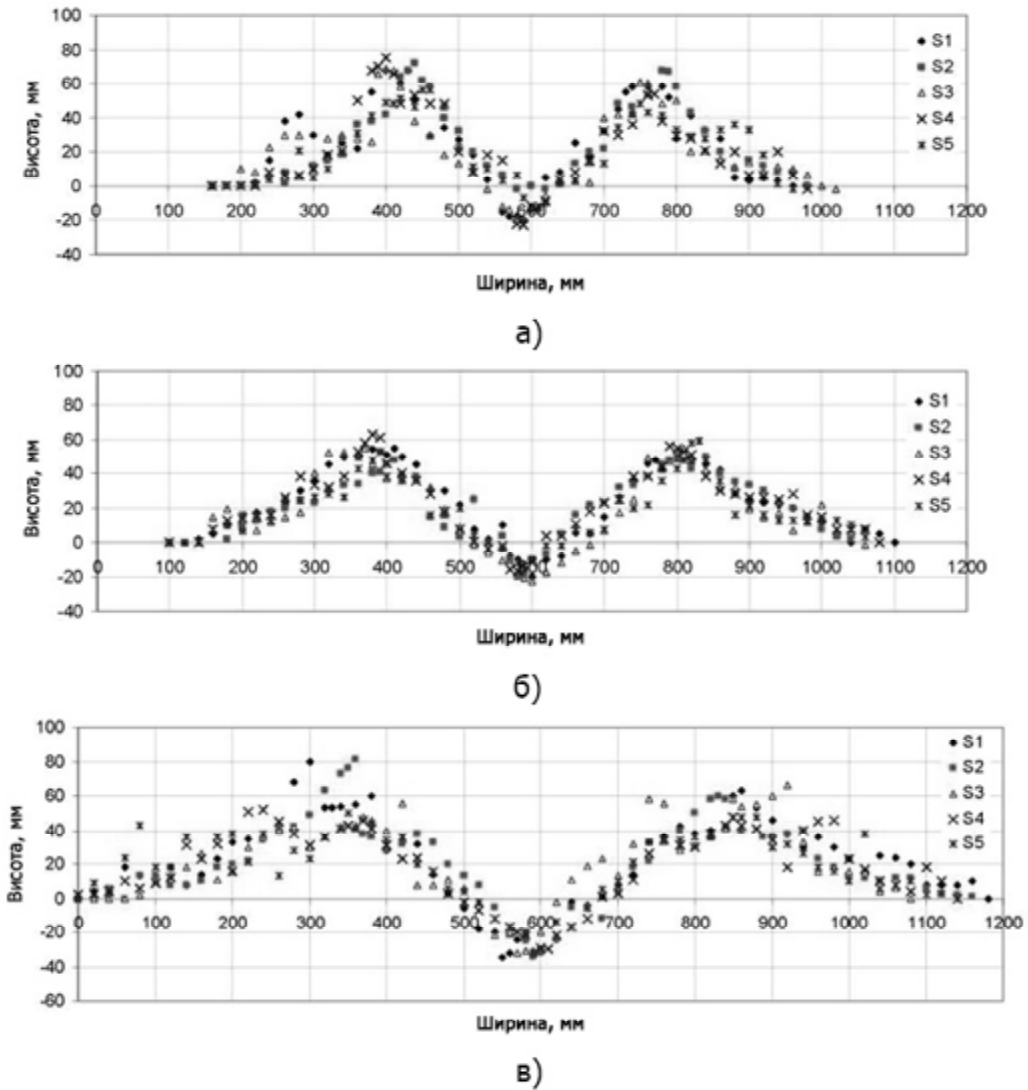


Рис. 4. Вимірювання перерізу ґрунту після проходу стріловидного знаряддя на глибині 100 мм: а) швидкість 5 км/год; б) швидкість 7,5 км/год; в) швидкість 10 км/год

Збільшення швидкості обробки ґрунту призводить до збільшення глибини борозни ( $d_1$  в табл.1). Отже, ширина зруйнованого ґрунту зі швидкістю стає більшою. Відстань між гребнями ( $2b_0$ ) і ширина переміщення ґрунту ( $2b$ ) значно зростають із збільшення швидкості обробки ґрунту (табл. 1). Внутрішній кут гребня ( $\varphi_i$ ) знач-

но зменшується, коли швидкість обробки ґрунту збільшується до 7,5 км/год, аевін не змінюється при швидкості 10 км/год. Зовнішній кут гребеня ( $\varphi_0$ ) зменшується при збільшенні швидкості обробки ґрунту, і стає менший, ніж  $\varphi_i$ . В результаті гребені як правило, стають плоскішими на більш високій швидкості обробки ґрунту.

Таблиця 1

Середні значення параметрів перерізу ґрунту залежно від швидкості

Швидкість, км/год	$b_0$ , мм	$b$ , мм	$h$ , мм	$d_1$ , мм	$\varphi_i$ , градуси
5	172	388	63	14	24
7,5	214	472	54	19	18
10	250	564	58	32	19

На рис. 4 видно, що профіль гребня дуже близький до рівнобедреного трикутника при швидкості 5 км/год. Проте немає нічого схожого із рівнобедреним трикутником на швидкостях 7,5 і 10 км/год (рис. 4 б і в).

Розробимо модель переміщення ґрунту, яка передбачає, що грудочки ґрунту переміщують-

ся до точки  $F$  (Рис. 5), а потім починають котитися і/або зісковзувати. Припустимо, що ці грудочки котяться і зісковзують не завжди однаково при формуванні гребеня, а ґрунт переміщений коченням/ковзанням, характеризуєбичне середнє переміщення всіх грудочок ґрунту.

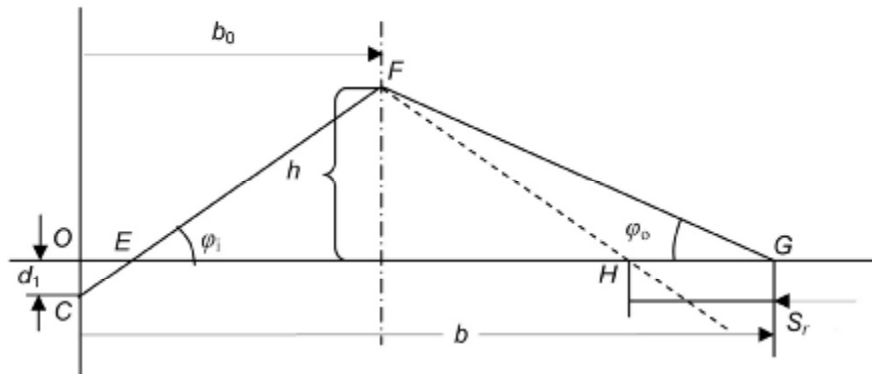


Рис. 5. Геометричні залежності перерізу ґрунту після обробки стріловидним знаряддям ( $S_r$ : середнє бічне переміщення ґрунту коченням/ковзанням)

Перед обробкою ґрунту ми маємо плоску і порівняно гладеньку поверхню, що дозволяє грудочкам ґрунту легко котитися або зісковзувати. Під час обробки, коли деякі грудочки ґрунту розподіляються, поверхня ґрунту стає нерівною і відстань переміщення грудочок коченням/ковзанням скорочується на нерівну поверхню. Проте переміщення лінійно розподілене між верхньої та нижньої частинами гребеня. В результаті асиметрична частина  $FGH$  (Рис. 5) в профілі гребня викликає коченням/ковзанням грудочок, а трикутник  $EFH$  відповідає профілю рівнобедреного трикутника  $A_1TA_2$ , на рис. 3.

Ми припускаємо, що обсяг ґрунту збільшується після роботи знаряддя. ґрунтові маси в області  $OO_BQ_BQ$  (Рис. 3) складаються із ряду кубиків (Рис. 6). Коли знаряддя проходить ці кубики вони хаотично перерозподіляються, і кожен кубик займає площу кульки з діаметром  $\sqrt{2}a$ . Всі кубики перетворюються у стоскульок. Ми не враховуємо проміжнимі міжкульками. Через те, що кожний кубик займає окремий простір, перерозподіл цих кубиків ґрунту призводить до збільшення об'єму. Для моделювання перерізу ґрунту удвоєнимірному прос-

торі, збільшення об'єму ґрунту розглядається у площині, перпендикулярній до переміщення знаряддя. У такому випадку, кубики розглядаються на площині у вигляді квадратів. Стокульок стає стосом кіл. Таким чином кожна площа, яку займає окремий квадрат:

$$\Delta A_0 = \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) a^2 \quad (1)$$

Загальна кількість кубиків  $\frac{0,5w}{a} \cdot \frac{d}{a}$ , а загальна площа збільшення об'єму ( $\Delta A$  на рис. 6) в цьому випадку:

$$\Delta A = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) w d \quad (2)$$

де  $w$  ширина знаряддя;  $d$  глибини обробітку.

Збільшений об'єм ґрунту розподіляється в області гребеня  $EFG$  (Рис. 5). Крім того, ґрунт розташована в області  $OCE$  та кожна впливає на площу гребеня. Тобто площа збільшення об'єму  $\Delta A$  плюс площа  $OCE$  дорівнює області  $EFG$ .

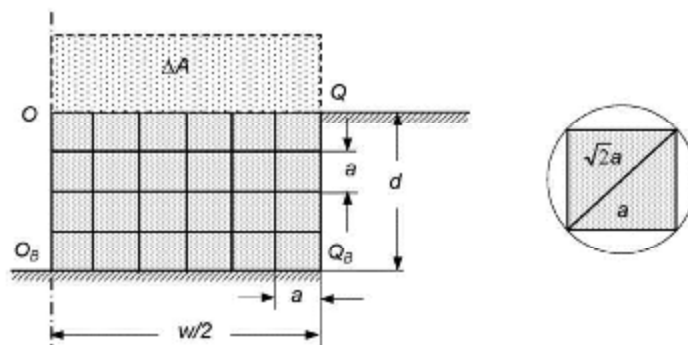


Рис. 6. Схематичне припущення збільшення об'єму ґрунту після проходу знаряддя

Переміщення ґрунту під час утворення гребенів може бути обчислене з використанням наступних рівнянь:

$$S_f = d \frac{\cos(\beta - \xi) - \cos \beta}{2 \sin \beta} + \frac{w}{4} (1 - \cos \xi) \quad (3)$$

$$S_p = y - y_0 = \frac{v_y}{g} \left( \sqrt{v_z^2 + 2z_0 g} + v_z \right) \quad (4)$$

$$S_r = \frac{v_y^2}{2\mu g} \quad (5)$$

$$\begin{cases} v_y = \left\{ \left( \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} v_i + \frac{\sqrt{2}}{2} \alpha v_i \right) \sin(\beta - \alpha) + \frac{\sqrt{2}}{2} \xi v_i \right\} \cos(\beta - \xi) \\ v_z = \left\{ \left( \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} v_i + \frac{\sqrt{2}}{2} \alpha v_i \right) \sin(\beta - \alpha) + \frac{\sqrt{2}}{2} \xi v_i \right\} \sin(\beta - \xi) \end{cases} \quad (6)$$

$$h = \frac{1}{2} \left( \sqrt{(2b_0 + S_r)^2 + (2\pi - 4)wd \cot \varphi_i + 4b_0^2} - (2b_0 + S_r) \right) \tan \varphi_i \quad (8)$$

$$d_1 = b_0 \tan \varphi_i - h \quad (9)$$

$$b = b_0 + h \cot \varphi_i + S_r \quad (10)$$

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \left( \frac{h}{h \cot \varphi_i + S_r} \right) \quad (11)$$

де

$x_0, y_0, z_0$ -координати центральної точки задньої кромки крила знаряддя, м;

$S_f$  - бічне примусове переміщення, м;

$S_D$  - бічне переміщення розкиданням, м;

$S_r$  - бічне середнє переміщення каченням і ковзанням, м;

$d$  - глибина обробітку, м;

$g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$w$  - ширина знаряддя, м;

$v_i$  - швидкість переміщення знаряддя, м/с;

$v_y$  - бічна складова швидкості переміщення ґрунту, м/с;

$v_z$  - вертикальна складова швидкості переміщення ґрунту, м/с;

$\alpha$  - кут розпушення плоскоріжучого стрілкового знаряддя, рад;

Залежності між параметрами, використаними в моделі, показаній на рис. 5 виводяться у вигляді рівнянь 7 - 11.

$$b_0 = \frac{w}{4} + S_f + S_p \quad (7)$$

$\beta$  - кут неоднорідності ґрунту  $\beta = 45^\circ - \phi / 2$ , рад;

$\phi$  - кут внутрішнього тертя ґрунту, рад;

$\xi$  - кут бічного нахилу стрілоподібного знаряддя, рад;

$\mu$  - коефіцієнт тертя між поверхнею ґрунту і грудкою.

Якщо використати координати будь-якої точки відрізка  $CB$  або  $CG$  (Рис. 2), можна обчислити переміщення ґрунту з використанням рівнянь 8 - 11. Зміщення центральної точки  $P$  на відріжку  $CB$  розраховується і розглядається, як середнє зміщення ґрунту.

Використовуючи рівняння 3 - 7, а також значення внутрішнього кута гребеня ( $\varphi_i$ ) наведені в табл. 1 були розраховані параметри перерізу ґрунту. Для перевірки розрахункових даних, було використано виміри перерізу ґрунту отримані під час випробування. Розраховані параметри виміряні значення перерізу ґрунту наведені в табл. 2 для порівняння.

Таблиця 2

Порівняння середніх розрахованих і виміряних параметрів перерізу ґрунту

	Швидкість обробітку, (км/год)	5	7.5	10
$b$ (мм)	Виміряне значення	388	472	564
	Розраховане значення	334	419	504
	Відносна похибка, (%)	14	11	11
$h$ (мм)	Виміряне значення	63	54	58
	Розраховане значення	61	53	52
	Відносна похибка, (%)	3	2	10
$b_0$ (мм)	Виміряне значення	172	214	250
	Розраховане значення	168	208	251
	Відносна похибка, (%)	2	3	0,4
$d_1$ (мм)	Виміряне значення	14	19	32
	Розраховане значення	11	17	31
	Відносна похибка, (%)	16	9	3

Ми бачимо, що за допомогою моделі ґрунтового перерізу можна правильно розрахувати ширину розподілу ґрунту ( $2b$ ) з відносною похибкою 14% або і нижче, при швидкості 5, 7,5 і 10 км/год. Розрахункова висота гребеня  $h$  і відстань між гребнями  $2b_0$  мають похибку 10% і 3% відповідно. Для глибини борозни  $d_1$ , максимальна відносна похибка складає 16% при швидкості обробітку 5 км/год. З огляду на це порівняння можна сказати, що модель ґрунтового профілю працює добре в діапазоні швидкостей від 5 до 10 км/год.

#### Висновки

В результаті дослідження процесів переміщення ґрунту виділено основні параметри, що на них впливають, виведено їх основні за-

лежності на основі яких розроблено математичну модель. Завдяки даній моделі можна передбачити глибину внесення біодобрив. Глибина внесення добрив - глибина обробки мінус глибина борозни  $d_1$ , залежно від зміни швидкості обробки ґрунту. Ця модель також допоможе у розробці моделі ґрунтової і водної розсії, завдяки прогнозуванню розмірів гребеня ґрунтового профілю.

Параметри знаряддя, такі як ширина, кут розпушення, кут нахилу впливають на переміщення ґрунту та його розподілення. При розробці плоскоріжучого знаряддя, ця модель може бути використана для моделювання потрібного розподілу ґрунту для конкретного застосування шляхом зміни параметрів. Збільшення

швидкості обробітку призводить до збільшення ширини переміщення ґрунту  $2b$  і відстані між гребнями  $2b_0$ . При цьому їх висота  $h$  зменшується. Внутрішній кут гребеня  $\varphi$ , зменшується із збільшенням швидкості, проте він завжди біль-

ший ніж зовнішній  $\varphi_0$ . Це означає, що сформований гребень має форму різностороннього трикутника. Збільшення глибини внесення добрив ( $d_1$ ) спричиняє формування гребенів більшої висоти із більшою відстанню між ними ( $2b_0$ ).

#### **Список використаної літератури:**

1. Dowell F. E. Cultivator speed and sweep spacing effects on herbicide incorporation / F. E. Dowell, J. C. Siemens, L. E. Bode. – Transactions of the ASABE, 1988.
2. Changes in soil microtopography by tillage with a sweep / [H. M. Hanna, D. C. Erbach, S. J. Marley, S. W. Melnin]. – Transactions of the ASABE, 1993.
3. Sharifat K. Lateral soil movement by tillage tools / K. Sharifat, R. L. Kushwaha. – St. Joseph, Mich.: ASAE, 1999.
4. Slurry distribution in soil as influenced by slurry application micro rate and injection tool type / [S. Rahman, Y. Chen, K. Buckley, W. Akinremi]. – Biosystems Eng., 2004.
5. Liu J. Modeling of Soil Profile Produced by a Single Sweep Tool [Електронний ресурс] / J. Liu, R. L. Kushwaha – Режим доступу: <http://ecommons.library.cornell.edu/handle/1813/10586>.

#### **Чернявский М.М. Исследование перемещения почвы при обработке плоскорезущим орудием для внесения жидких биоудобрений**

Важным фактором качественного подпочвенного внесения жидких удобрений является их достаточное закрытие за счет перемещения грунта под воздействием орудия. Данная статья посвящена исследованию теоретических составляющих этого процесса. Для операции внесения жидкого биоудобрения в почву было избрано плоскорезущие стрельчатое орудие, поскольку оно обеспечивает наилучшее размещение удобрения. Работа данного орудия была исследована при глубине обработки 100 мм на скоростях 5, 7,5 и 10 км / ч. Исходные данные для разработки модели перемещения грунта были такие: свойства почвы, глубина обработки, скорость обработки и параметры орудия. Основными параметрами для описания сечения почвы были высота гребня, расстояние между гребнями, глубина борозды и ширина перемещения грунта. Разработанная в результате исследования математическая модель перемещения грунта показывает, что данный процесс зависит от ширины орудия, угла разрыхления, глубины и скорости обработки. Сравнение рассчитанных и измеренных значений показывает, что максимальная относительная погрешность составляет 16%.

**Ключевые слова:** сечение почвы, подпочвенное внесения, стрельчатое орудия, математическая модель, параметры орудия, теоретическая зависимость.

#### **Cherniavsky M. Research of soil movement during tillage process by tool for liquid bio-fertilizers**

Important factor of quality application of liquid fertilizers into ground is their adequate closure by moving soil under tool action. This article is devoted to the study of theoretical components of this process. As the liquid fertilizer is suggested to use the remaining substrate of biogas production that is known for its benign effect on soil structure and plant growth. For the operation of liquid bio-fertilizers application in soil was chosen sweep tool because it provides the best placement of the fertilizer. The sweep was operated at 100 mm deep and speeds of 5, 7,5 and 10 km/h. The parameters involved in the soil displacement model were soil properties, tillage depth, tillage speed, and tool parameters. The model parameters describing soil profile included ridge height, ridge spacing, furrow depth, and the width of soil distribution. A mathematical model of the movement of soil indicates that this process depends of the working width of the tool, front angle, depth and speed of treatment. Placing of biofertilizers characterized by an area of mixing with the soil, that depending of application rate, soil bulk density and moisture content in it. Results showed that the model had maximum error of 16% for all parameters predicted.

**Keywords:** soil profile, application into ground, sweep tool, mathematical model, parameters of sweep, the theoretical dependence.

Дата надходження до редакції: 10.09.2015

Рецензент: д.т.н., проф. Топілін Г.Є.