

УДК 631.316.22

S. V. Kravets, Dr. Sc. (Tech), Prof.,
O. V. Stinio

National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne, Ukraine, e-mail: sashastinio@gmail.com

THE DETERMINATION OF THE FORCE OF BLOCKED CUTTING OF SOIL AND COEFFICIENT OF ENERGY INTENSITY OF DEEP RIPPING OF SOIL

С. В. Кравець, д-р техн. наук, проф.,
О. В. Стінь

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна, e-mail: sashastinio@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ БЛОКОВАНОГО РІЗАННЯ ТА КОЕФІЦІЄНТА ЕНЕРГОЄМНОСТІ РОЗПУШУВАННЯ ҐРУНТУ

Purpose. The main parameters of soil rippers are determined provided that the cutting force and the coefficient of energy intensity of soil ripping will have minimum values. To ensure the minimum energy intensity of soil ripping, argumentation of parameters of working bodies should be carried out with taking into account the critical depth of soil ripping, because ripping of soil on the critical depth provides the lowest energy intensity. Therefore, there is necessity to determine the force of blocked cutting and coefficient of energy intensity of soil ripping on the critical depth.

Methodology. Mathematical modeling of processes of cutting and ripping of soil.

Results. To determine the force of blocked cutting of soil on the critical depth, we accept that the soil is homogeneous isotropic medium that is characterized by hooking, internal and external friction, strength and humidity. In accordance with the scheme of interaction of soil with working body (after the projection of all the forces on the horizontal ax), we obtain the equilibria equation from which we determine the force of blocked cutting of soil on the critical depth, and take into account fact that cutting width of working body varies with depth of soil ripping and the cutting angle to supply ripping of soil on the critical depth. When division of force of blocked cutting of soil to cross-sectional area of ripped soil we get coefficient of energy intensity of soil ripping on the critical depth.

Findings. From the mathematical model for determine the force of blocked cutting and coefficient of energy intensity of soil ripping was justified the width and cutting angle of working bodies of rippers that operate on the critical depth.

Originality. Scientific novelty lies in getting the analytical dependence for determination of force of blocked cutting and coefficient of energy intensity of soil ripping on the critical depth based on the depth of cutting, and the physical properties of soil.

Practical value. It lies in the establishing of the optimal cutting angles and width of working bodies of rippers, that working at the blocked cutting on the critical depth, depending on the depth of soil ripping, and the physical properties of soil.

Keywords: *cutting angle, depth of ripping, cutting width, critical depth, cutting force, blocked cutting, coefficient of energy intensity*

Introduction. Owing to the creation of superpower special tractors and improving of design of rippers, mechanical ripping has found its wide application at open mining for the last 15–20 years. Under certain circumstances, especially during the resource development and selective extraction of minerals with significant fluctuations of quality which demand averaging before serving on the processing plant, mechanical ripping is economically more advantageous than traditional drill and fire system [1]. Nowadays one of the main requirements for the design and improvement of construction of soil ripper is reducing the energy intensity of their work, i. e. the installation of constructive parameters of soil ripper, in which the cutting

force of the soil and coefficient of energy intensity get minimal values.

The research analysis and publications. The lowest energy intensity of soil ripping is provided by ripping of the soil at the critical depth [2, 3]. The research studies of blocked force of soil cutting have been considered in the works by Yu. O. Vetrova, A. M. Zeleznina, V. Sokolovskyi, V. P. Horiachkina and others. However, the data do not include the ripping of the soil depending on the critical depth and are experimental.

Unsolved aspects of the problem. With regard to the foregoing, there is a need for analytical definition of blocked force and coefficient of energy intensity of cutting soil at the critical depth.

Presentation of the main research. To determine the force of blocked cutting of the soil at the crit-

ical depth, we use the scheme (Fig. 1) in accordance with which we take the initial conditions:

1) the soil is homogeneous isotropic medium that is characterized by clutch, internal and external friction, density and moisture;

2) an element of chip is viewed as a solid body in the form of a triangular prism with two symmetrical conical sectors on each side [3] (Fig. 1, *b*);

3) the critical depth is constant regardless of work of the working body in landing mode or in steady mode [2];

4) the influence of cutting speed on traction resistance of its destruction is ignored [2];

5) the normal law of pressure distribution on the frontal plane of the working body in the chipping area is taken linear for the depth [3].

At the time of the previous shearing process, the elementary volume of the chip element that is dh high is affected by the following acting forces which are given in the vertical plane of the OAD (Fig. 1, *a*): active force $dN' = \frac{dN}{\cos\varphi}$, which is directed at an angle of

external soil friction ϕ to normal of the frontal plane of the working body; normal reaction $dN_{c.bl}$ and tangential forces $dT_{c.bl}$, $2dT_{side.bl}\cos\delta$ – at the shear plane of soil.

To determine the cutting force in accordance with the scheme (Fig. 1, *a*) it let us comprise an equilibrium relation on the axis OX

$$\sum P_{OX} = -dN_{c.bl} \cdot \sin\psi - dT_{c.bl} \cdot \cos\psi - 2dT_{side.bl} \cdot \cos\delta \cdot \cos\psi + dN' \cdot \sin(\alpha_r + \varphi) = 0. \quad (1)$$

From work of Kravets S. V. [2] the normal reaction $dN_{c.bl}$ and tangential forces $dT_{c.bl}$, $2dT_{side.bl}\cos\delta$ at the shear plane of the soil are equal

$$dN_{c.bl} = -\frac{\cos(\alpha_r + \varphi + \psi)}{\cos\varphi \cdot \sin\alpha_r} \cdot b_{bl} \left(q_0 + \frac{q_{cr} - q_0}{h_{bl}} k_{per} h \right) dh; \quad (2)$$

$$dT_{c.bl} = -\text{tg}\varphi_0 \frac{\cos(\alpha_r + \varphi + \psi)}{\cos\varphi \cdot \sin\alpha_r} b_{bl} \times \left(q_0 + \frac{q_{cr} - q_0}{h_{bl}} k_{per} h \right) dh +$$

$$+ c \cdot (2\rho(\text{ctg}\alpha_r + \text{ctg}\psi)(h_{bl} - h) + b_{bl}) dh; \quad (3)$$

$$dT_{side.bl} = c \cdot (\text{ctg}\alpha_r + \text{ctg}\psi)(h_{bl} - h) \frac{dh}{\cos\lambda}, \quad (4)$$

where φ_0 is an angle of internal friction of the soil; α_r is a cutting angle of the working body; h_{bl} , b_{bl} are the critical depth and cutting width of the working body respectively; c is a coefficient of clutch of the soil; k_{per} is the ratio of the depth of the zone of guaranteed chipping of soil ($k_{per} = 0,9-0,95$); h is the current value of depth; ψ is angle longitudinal chipping of the soil, which is determined depending on the cutting angle of the working body

$$\psi = a_\psi + k_\psi \alpha_r, \quad (5)$$

where a_ψ , k_ψ are interpolation coefficients that depend on physical properties of the soil [2]; q_0 is the minimal soil pressure that acts at the surface [2]

$$q_0 = c \cdot \text{tg}\varphi_0 (A_1 - 1), \quad (6)$$

where A_1 is the coefficient which depends on the cutting angle of the working body and is determined by Sokolovsky's formula for intermediate sides [3]; q_{cr} is the soil strength [4]

$$q_{cr} = \left(\gamma_s h_{bl} + \frac{c}{\text{tg}\varphi_0} \right) \text{tg}^4 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right), \quad (7)$$

where γ_s is the specific gravity of the soil [5]; ρ , δ , λ are angles that are formed by the side plane of chipping with the vertical plane and are defined with geometric relations (Fig. 1, *c*) [2]

$$\rho = \arccos \sqrt{1 - \left(\frac{\text{ctg}\gamma}{\text{ctg}\alpha_r + \text{ctg}\psi} \right)^2}; \quad (8)$$

$$\lambda = \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\text{ctg}\alpha_r \cdot \text{ctg}\gamma}{\text{ctg}\alpha_r + \text{ctg}\psi} \right)^2}}; \quad (9)$$

$$\delta = \arccos \left(1 - 2(\text{ctg}\alpha_r + \text{ctg}\psi) \sin^2 \psi \cdot \sin^2 \frac{\rho}{2} \right). \quad (10)$$

γ is the angle of inclination of side chip planes to the horizon

$$\gamma = \arccos \left(\frac{c \cdot \cos\varphi_0}{\left(1 - 0,74 \text{tg}\varphi_0 - \frac{1,52 \cdot c}{q_{cr}} \right) \cdot q_{mid}} \right) - \varphi_0, \quad (11)$$

where q_{mid} is the middle pressure of ground on the frontal plane of knife

$$q_{mid} = \frac{q_{cr} + q_0}{2}. \quad (12)$$

After substituting values of $dN_{c.bl}$, $dT_{c.bl}$, $dT_{side.bl}$ in equation (1) we get

$$\begin{aligned} & \text{tg}\varphi_0 \frac{\cos(\alpha_r + \varphi + \psi)}{\cos\varphi \cdot \sin\alpha_r} b_{bl} \left(q_0 + \frac{q_{cr} - q_0}{h_{bl}} k_{per} h \right) dh \cdot \cos\psi + \\ & + \frac{\cos(\alpha_r + \varphi + \psi)}{\cos\varphi \cdot \sin\alpha_r} b_{bl} \left(q_0 + \frac{q_{cr} - q_0}{h_{bl}} k_{per} h \right) dh \cdot \sin\psi - \\ & - c \cdot (2\rho(\text{ctg}\alpha_r + \text{ctg}\psi)(h_{bl} - h) + b_{bl}) \frac{dh}{\sin\psi} \cdot \cos\psi - \\ & - 2\cos\delta \cdot c \cdot (\text{ctg}\alpha_r + \text{ctg}\psi)(h_{bl} - h) \frac{dh}{\cos\lambda} \cdot \cos\psi + \\ & + dN' \cdot \sin(\alpha_r + \varphi) = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

After integration of expression (13) in the range of 0 to h_{bl} , and after intermediate mathematical transformations, we obtain a mathematical model to determine the force of blocked cutting of the soil at the critical depth.

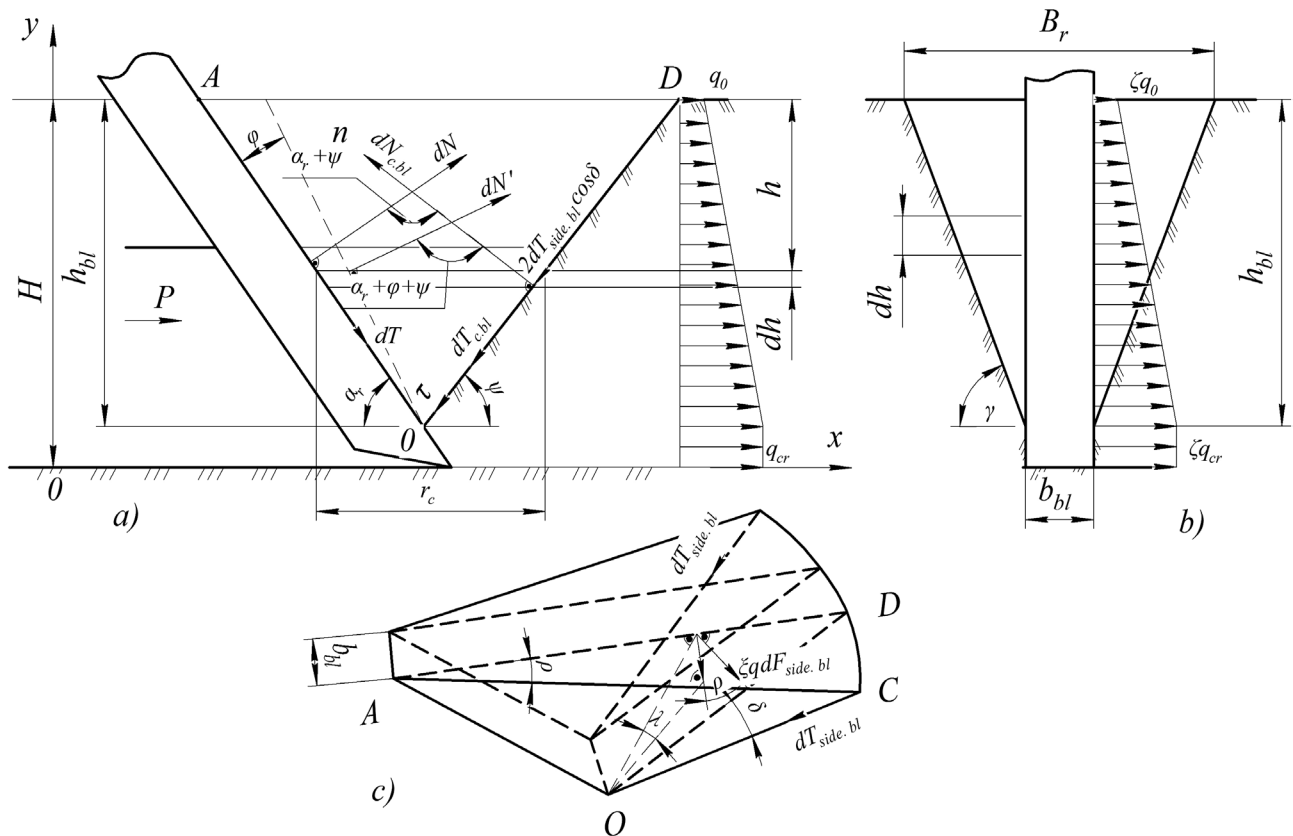


Fig. 1. Scheme of interaction of the working body with the soil environment in blocked cutting Soil: a – in the longitudinal plane; b – in the transverse plane; c – the form of element of chips in landing mode

$$P_{bl} = \frac{\left(-h_{bl} b_{bl} \left(q_0 + \frac{q_{cr} - q_0}{2} k_{per} \right) \times \right.}{\cos \varphi \cdot \sin \alpha_r} + \quad (14)$$

$$\left. \times (\operatorname{tg} \varphi_0 \cdot \cos \psi + \sin \psi) \cos (\alpha_r + \varphi + \psi) \right) +$$

$$+ h_{bl}^2 \cdot c \cdot (\operatorname{ctg} \alpha_r + \operatorname{ctg} \psi) \left(\rho \cdot \operatorname{ctg} \psi + \frac{\cos \delta \cdot \cos \psi}{\cos \lambda} \right) +$$

$$+ c \cdot h_{bl} \cdot b_{bl} \operatorname{ctg} \psi.$$

For soil ripping, the depth of ripping is an output parameter. To ensure ripping of the soil at the critical depth by changing the depth of ripping and the cutting angle, the cutting width of the working body for each case is calculated by the formula

$$b_{bl} = \frac{h_{bl} \cdot (\operatorname{tg} \alpha_r)^n}{a}, \quad (15)$$

where a , n are the approximation coefficients which depend on the physical and mechanical properties of the soil [2].

The dependence curves of the forces of blocked cutting at the critical depth on the cutting angle and depth of ripping is given in Fig. 2. Physical and mechanical properties of soils are given in the table.

The analysis of the graphics in Fig. 2 shows that for each type of the soil, the value of blocked cutting force increases with increase in the cutting angle. The dependences of the blocked cutting force of the soil on

the depth of ripping for different values of the cutting angle are confirmed by experimental studies of Rynkevych V.S., Kravets S.V., Vetrov Y.A., Zelenin A.M. etc.

To assess the energy intensity of the process of deep ripping of the soil at the critical depth, let us define the coefficient of energy intensity. The coefficient of energy intensity of soil ripping is defined as the ratio of

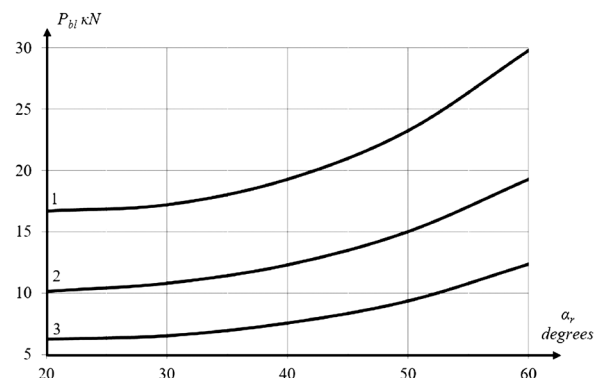


Fig. 2. Dependence of the force of blocked cutting of the soil on changing the cutting angle at the critical depth of ripping of three types of soil, critical depth is $h_{bl} = 0.3 \text{ M}$:

1 – semisolid clay; 2 – semisolid loam; 3 – solid sandy loam

Table
Basic physical and mechanical properties of soils

The main soil criteria	Type of soil		
	Solid sandy loam	Semisolid loam	Semisolid clay
The coefficient of clutch c , MPa	0.02	0.04	0.06
Internal friction angle φ_0 , deg	28	23	20
Angle of soil friction on steel φ , deg	25	21	22

the cutting force to the cross-sectional area of the ripped soil

$$E_{bl} = \frac{P_{bl}}{F_{bl}}, \quad (16)$$

where F_{bl} is the cross sectional area of the ripped soil, Fig. 1, b .

$$F_{bl} = h_{bl}b_{bl} + h_{bl}^2 \cdot \text{ctg} \gamma. \quad (17)$$

The dependence curves of the energy intensity coefficient of blocked ripping of the soil on the cutting angle at the critical depth for different soils are given in Fig. 3.

From the dependence curves (Fig. 3) we see that the optimal values of the intensity coefficient of deep soil ripping for semi-solid loam and solid sandy loam are within the cutting angle ($\alpha_r = 20-30^\circ$), for semi clay the angle is ($\alpha_r = 25-35^\circ$). With the destruction of the soil at the critical depth the coefficient of energy intensity of deep ripping of the soil is constant for each cutting angle irrespective of the ripping depth because with the change of the depth, depending on the cutting angle, the ratio between the width and depth of ripping is stored for ripping of the soil at the critical depth.

Conclusions. The accuracy of the values of the blocked force of soil cutting obtained by the formula

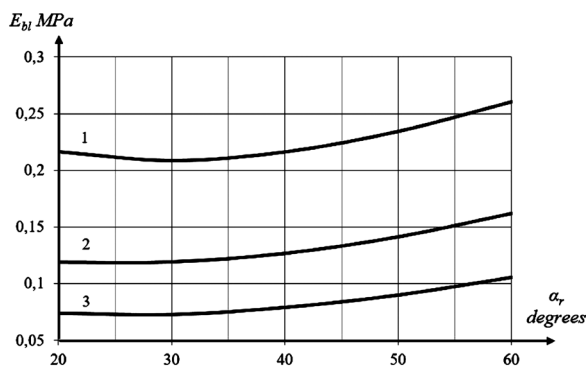


Fig. 3. Dependence of the energy intensity of deep ripping of the soil on the cutting angle at the critical depth:

1 – semisolid clay; 2 – semisolid loam; 3 – solid sandy loam

(14) is confirmed by experimental research studies by other authors. The optimal cutting angles were defined for the most common types of the soil: for semi-solid loam and solid sandy loam ($\alpha_r = 20-30^\circ$); for semi-solid clay ($\alpha_r = 25-35^\circ$; for such angles, the values of the energy intensity of deep ripping of the soil at the critical depth are minimal. During the ripping of the soil at the critical depth, the energy intensity coefficient of blockaded cutting of the soil does not depend on the depth of cutting and therefore optimum cutting angles do not change during the changing of the value of the critical depth.

References/Список літератури

1. Pashkov A. P., 2008. *Resursozberihayuchi tehnologiyi v hirnyystvi* [Energy saving technologies in mining], Kyiv: NTUU “KPI”.

Пашков А. П. Ресурсозберігаючі технології в гірництві / Пашков А. П. – К.: НТУУ „КПІ”, 2008. – 102 с.

2. Kravets S. V., 1999. *Hruntozahysni ta enerhozberihayuchi mashyny dlia prokladannia pidzemnykh komunikatsii* [Soil protective and energy-saving machines for laying of underground communications], Rivne: RDTU.

Кравець С. В. Грунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладання підземних комунікацій / Кравець С. В. – Рівне: РДТУ, 1999. – 278 с.

3. Khmara L. A., 2010. *Mashyny dlia zemlianykh robot* [Earth-Moving Machines], Rivne-Dnipropetrovsk-Kharkiv.

Машини для земляних робіт / [Хмара Л. А. та ін.] – Рівне-Дніпропетровськ-Харків, 2010. – 557 с.

4. Panov I. M., and Vetokhin V. I., 2008, *Fizicheskie osnovy mekhaniku pochv* [Physical fundamentals of soil mechanics], Kyiv: “Feniks”.

Панов И. М. Физические основы механики почв / Панов И. М., Ветохин В. И. – К.: „Феникс”, 2008. – 266 с.

5. Shvets V. V., Boyko I. P., Vynnykov Yu. L., and Zocenko O. O., 2014. *Mekhanika gruntiv. Osnovy ta fundamenti* [Soil Mechanics. Bases and Foundations], Dnipropetrovsk “Porohu”

Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти / [Швець В. В., Бойко І. П., Винников Ю. Л. та ін.] – Дніпропетровськ: „Пороги”, 2014. – 231 с.

Мета. Основні параметри розпушувачів ґрунту визначаються за умови, що сила різання та коефіцієнт енергоємності розпушування ґрунту є мінімальними. Для забезпечення мінімальної енергоємності процесу розпушування ґрунту, обґрунтування параметрів робочих органів необхідно проводити з урахуванням критичної глибини розпушування, оскільки розпушування ґрунту на критичній глибині забезпечує найменшу енергоємність. Отже, постає необхідність визначити сили блокованого різання та коефіцієнта енергоємності розпушування на критичній глибині.

Методика. Математичне моделювання процесів різання та розпушування ґрунту.

Результати. Для визначення сили блокованого різання ґрунту на критичній глибині приймаємо, що ґрунт – однорідне ізотропне середовище, що характеризується зчепленням, внутрішнім і зовнішнім тертям, міцністю, вологістю. У відповідності до схеми взаємодії робочого органу з ґрунтом (після проектування всіх сил на горизонтальну вісь) отримуємо рівняння рівноваги, з якого визначаємо силу блокованого різання ґрунту на критичній глибині з урахуванням того, що ширина різання ґрунту змінюється зі зміною глибини розпушування та кута різання робочого органу, для забезпечення розпушування на критичній глибині. При відношенні сили блокованого різання ґрунту до площі поперечного перерізу розпушеного ґрунту отримуємо коефіцієнт енергоємності розпушування ґрунту на критичній глибині. Із математичної моделі, для визначення сили блокованого різання та коефіцієнта енергоємності розпушування ґрунту, були обґрунтовані ширина й кут різання робочих органів розпушувачів, що працюють при блокованому різанні ґрунту.

Наукова новизна. Полягає в отриманні на критичній глибині аналітичної залежності для визначення сили блокованого різання ґрунту й коефіцієнта енергоємності процесу розпушування ґрунту з урахуванням критичної глибини різання та фізико-механічних властивостей ґрунту.

Практична значимість. Встановлені оптимальні значення кутів та ширини різання робочих органів розпушувачів, що працюють при блокованому різанні на критичній глибині в залежності від глибини розпушування та фізико-механічних властивостей ґрунту.

Ключові слова: *кут різання, глибина розпушування, ширина різання, критична глибина, сила різання, блоковане різання, коефіцієнт енергоємності*

Цель. Основные параметры рыхлителей почвы определяются при условии, что сила резания и коэффициент энергоёмкости рыхления почвы будут минимальны. Для обеспечения минимальной энергоёмкости процесса рыхления почвы, обоснование параметров рабочих органов необходимо проводить с учетом критической глубины рыхления, поскольку рыхление почвы на критической глубине обеспечивает наименьшую энергоёмкость. Итак, возникает необходимость опре-

делить силы блокированного резания и коэффициента энергоёмкости рыхления ґрунту на критической глубине.

Методика. Математическое моделирование процессов резания и рыхление почвы.

Результаты. Для определения силы блокированного резания почвы на критической глубине принимаем, что почва – однородная изотропная среда, что характеризуется сцеплением, внутренним и внешним трением, прочностью, влажностью. В соответствии со схемой взаимодействия рабочего органа с почвой (после проецирования всех сил на горизонтальную ось) получаем уравнение равновесия, из которого определяем силу блокированного резания ґрунту на критической глубине с учетом того, что ширина резания ґрунту изменяется с изменением глубины рыхления и угла резания рабочего органа для обеспечения рыхления на критической глубине. При отношении силы блокированного резания почвы к площади поперечного сечения разрыхленного ґрунту получаем коэффициент энергоёмкости рыхления почвы на критической глубине. Из математической модели, для определения силы блокированного резания и коэффициента энергоёмкости рыхления ґрунту, были обоснованы ширина и угол резания рабочих органов рыхлителей, работающих при блокированном резании ґрунту.

Научная новизна. Заключается в получении на критической глубине аналитической зависимости для определения силы блокированного резания ґрунту и коэффициента энергоёмкости процесса рыхления почвы на основе критической глубины резания и физико-механических свойств ґрунту.

Практическая значимость. Установлены оптимальные значения углов и ширины резания рабочих органов рыхлителей, работающих при блокированном резании на критической глубине в зависимости от глубины рыхления и физико-механических свойств ґрунту.

Ключевые слова: *угол резания, глубина рыхления, ширина резания, критическая глубина, сила резания, блокированное резание, коэффициент энергоёмкости*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук З. Р. Маланчуком. Дата надходження рукопису 13.05.15.