

УДК 621.878

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ВІДВАЛЬНОГО РОБОЧОГО ОРГАНА З МЕХАНІЧНИМ ІНТЕНСИФІКАТОРОМ ДЛЯ БІЧНОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ ҐРУНТУ

ХМАРА Л. А.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,  
ГОЛУБЧЕНКО О. І.<sup>2\*</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1</sup> Кафедра будівельних і дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (093) 267-03-86, e-mail: [leonidkhmara@yahoo.com](mailto:leonidkhmara@yahoo.com), ORCID ID: 0000-0003-3050-9302

<sup>2\*</sup> Кафедра будівельних і дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (050) 514-61-02, e-mail: [alexgol@ua.fm](mailto:alexgol@ua.fm), ORCID ID: 0000-0003-2971-1263

**Анотація. Постановка проблеми.** Земляні споруди і відповідні їм земляні роботи, які виконуються в різних видах будівництва, можна поділити за формою та розмірами на зосереджені та протяжні. До останніх належать земляні насипи та корита для автомобільних та залізничних доріг, меліоративні споруди, канали, а також земляні роботи з виконання зворотної засипки траншей та котлованів від поверхневих шарів чорнозему, робота щодо зимового утримання доріг. Для виконання вказаних робіт широко застосовуються землерійно-транспортні машини (ЗТМ) у вигляді бульдозерів, автогрейдерів, грейфер-елеваторів. Найбільш поширено серед них використовуються бульдозери як із прямим, так і з косовстановленим відвалом. Останній дозволяє перетворити бульдозер на машину безперервної дії, яка за рахунок тягового зусилля базової машини виконує зрізання ґрунту та його бічне транспортування. Однак суттєвим недоліком бульдозера з косовстановленим відвалом є неможливість транспортування ґрунту на значну відстань за його межі. Аналогічний недолік присутній в робочому обладнанні (РО) автогрейдера. Відстань бічного транспортування ґрунту грейдер-елеватором обмежується довжиною конвеєра. Усунути вказаний недолік допоможе застосування у РО ЗТМ механічних інтенсифікаторів (МІ), які дозволяють підвищити ефективність зовнішнього транспортування ґрунту, знизити опір зусилля копанню ґрунту. Тому підвищення ефективності земляних робіт ЗТМ із відвальними робочими органами за рахунок упровадження МІ для збільшення відстані та зміни напрямку бічного транспортування ґрунту – актуальне науково-прикладне завдання в галузі технічних наук. **Мета дослідження** – підвищення ефективності робочого процесу відвального робочого органа за рахунок інтенсифікації процесу бічного транспортування зрізаного ґрунту. **Висновок.** Результатами випробувань у лабораторних умовах фізичної моделі запропонованої конструкції відвального робочого органа з механічним інтенсифікатором у вигляді лопатевого металника підтверджена його працездатність та з'ясована фізична сутність робочого процесу. Виконані теоретичні дослідження робочого процесу копання ґрунту дозволили отримати математичні моделі для визначення геометричних, кінематичних та силових параметрів робочого обладнання та розробки методики його інженерного розрахунку.

**Ключові слова:** землерійно-транспортні машини; відвальний робочий орган; механічний інтенсифікатор; фізична модель; теоретичні дослідження; методика розрахунку

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ОТВАЛЬНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА С МЕХАНИЧЕСКИМ ИНТЕНСИФИКАТОРОМ ДЛЯ БОКОВОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГРУНТА

ХМАРА Л. А.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,  
ГОЛУБЧЕНКО А. И.<sup>2\*</sup>, к. т. н., доц.

<sup>1</sup> Кафедра строительных и дорожных машин, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, 49600, Украина, тел. +38 (093) 267-03-86, e-mail: [leonidkhmara@yahoo.com](mailto:leonidkhmara@yahoo.com), ORCID ID: 0000-0003-3050-9302

<sup>2\*</sup> Кафедра строительных и дорожных машин, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, 49600, Украина, тел. +38 (050) 514-61-02, e-mail: [alexgol@ua.fm](mailto:alexgol@ua.fm), ORCID ID: 0000-0003-2971-1263

**Аннотация. Постановка проблемы.** Земляные сооружения и соответствующие им земляные работы, которые выполняются в различных видах строительства, можно разделить по форме и размерам на сосредоточенные и протяжные. К последним относятся земляные насыпи или корыта для автомобильных и железных дорог, меліоративные сооружения, каналы, а также земляные работы по выполнению обратной засыпки траншей и котлованов от поверхностных слоев чернозема, работа по зимнему содержанию дорог. Для производства указанных работ широко используют землерійно-

транспортні машини (ЗТМ) в виде бульдозерів, автогрейдерів, грейдер-елеваторів. Найбільше широко серед них використовуються бульдозери як з прямим, так і косоустановленим отвалою. Останній дозволяє перетворити бульдозер в машину неперервного дійства, яка за рахунок тягового зусилля базової машини виробляє різання ґрунту і його бокове транспортування. Суттєвним недоліком бульдозера з косоустановленим отвалою є неможливість транспортування ґрунту на значительне відстані за його межі. Аналогічний недолік притаманний робочому обладнанню (РО) автогрейдера. Відстань бокового транспортування ґрунту грейдер-елеватором обмежується довжиною конвеєра. Ліквідувати вказаний недолік допоможе застосування в РО ЗТМ механічних інтенсифікаторів (МІ), які дозволяють підвищити ефективність зовнішнього транспортування ґрунту, знизити опір копанню ґрунту. Тому підвищення ефективності земляних робіт ЗТМ з отвальними робочими органами за рахунок впровадження МІ для збільшення відстані і зміни напрямку бокового транспортування ґрунту є актуальною науково-прикладною задачею в області технічних наук. **Ціль дослідження** – підвищення ефективності робочого процесу отвального робочого органа шляхом інтенсифікації процесу бокового транспортування срезанного ґрунту. **Висновок.** Результатами випробувань в лабораторних умовах фізичної моделі запропонованої конструкції отвального робочого органа з механічним інтенсифікатором в формі лопатного металевого підтверджено його работоспособність і встановлено фізичну сутність робочого процесу. На основі виконаних теоретичних досліджень робочого процесу копання ґрунту отримані математичні моделі для визначення геометричних, кінематичних і силових параметрів робочого обладнання і розробки методики інженерного розрахунку.

*Ключові слова:* землеройно-транспортні машини; отвальний робочий орган; механічний інтенсифікатор; фізична модель; теоретичні дослідження; методика розрахунку

## RESEARCH OF WORKING PROCESS OF DUMP WORKING ORGAN WITH MECHANICAL INTENSIFIER FOR LATERAL TRANSPORTING OF SOIL

KHMARA L.A.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
HOLUBCHENKO A.I.<sup>2\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Building and Traveling of Machines, State Higher Education Establishment “Prydniprov’ska State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Chernyshevskogo str., 24-a, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (093) 267-03-86, e-mail: [leonidkhmara@yahoo.com](mailto:leonidkhmara@yahoo.com), ORCID ID: 0000-0003-3050-9302

<sup>2\*</sup> Department of Building and Traveling of Machines, State Higher Education Establishment “Prydniprov’ska State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Chernyshevskogo str., 24-a, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 514-61-02, e-mail: [alexgol@ua.fm](mailto:alexgol@ua.fm), ORCID ID: 0000-0003-2971-1263

**Abstract. Raising of problem.** Earth structures and corresponding earth works being performed in different kinds of construction, can be divided according to the form and sizes into concentrated and expanded ones. The earth embattlements or troughs for highways and railways, meliorative structures, channels and also earth backing works, surface black soil layers removal, road winter maintenance work belong to expanded works. The earth moving and transport machines (EMTM) such as bulldozers, autograders, graders-elevators are widely used for the specified works. The bulldozers both with direct and oblique established blades are the most widely used ones. The latest one lets transform bulldozer into the machine of continuous action which due to tractive effort of the base machine performs soil cut-off and its lateral transportation. The essential defect the bulldozer with oblique established blades is impossibility to transport the soil to bigger distance from its location. The same defect inherent in the equipment work (EW) of autograder. The distance of the lateral transportation soil of grader-elevator is limited by the length of the conveyer. Removing of denoted defects lets the use of mechanical insifiers (MI) in EW EMTM which let to improve the efficiency of external soil transportation to reduce the resistance to soil digging. That is why the improval of earth work efficiency of EMTM with blade working members due to implementation of MI for increasing the distance and changing the direction of lateral soil transportation is the topical scientific-applied task in the field of technical sciences. **The purpose of the article.** Improvement of the working process efficiency of blade working member by intensifying the process of lateral cut-off soil transportation. **Conclusion.** The working capacity of physical model of offered blade working member construction with mechanical intensifier in the form of the ban caster has been confirmed by the results of testing in the laboratory conditions and the essence of the working process has been determined by it. The mathematic models for determining geometric, cinematic and force parameters of the working equipment have been obtained on the base of the fulfilled theoretical investigations of digging soil working process and the methods for engineering calculations have been developed.

*Keywords:* earth working and transport machines; blade working member; mechanical intensifier; physical model; theoretic investigations; calculation methods

### Постановка проблеми

Земляні споруди і відповідні їм земляні роботи, які виконуються в різних видах будівництва, можна

поділити за формою та розмірами на зосереджені та протяжні. До останніх відносять земляні насипи або корита для автомобільних та залізничних доріг, меліоративні споруди, канали, а також земляні роботи з виконання зворотної засипки траншей та

котлованів, від поверхневих шарів чорнозему, роботи щодо зимового утримання доріг.

Для виконання вказаних робіт широко застосовуються землерийно-транспортні машини, такі як бульдозер, автогрейдер, грейдер-елеватор. Найбільш поширено серед них використовується бульдозер, як із прямим, так і з косовстановленим відвалом. Із прямим відвалом бульдозер працює як машина циклічної дії і тому має низьку продуктивність.

Оснащення такого типу машини косовстановленим відвалом дозволяє перетворити бульдозер на машину безперервної дії, яка за рахунок тягового зусилля базової машини виконує зрізання ґрунту та переміщення призми волочіння, що накопичується перед відвалом у бічну сторону. Однак суттєвий недолік бульдозера з косовстановленим відвалом – це неможливість транспортування ґрунту на значну відстань за його межі. Аналогічно і конструкція робочого обладнання автогрейдера хоч і дозволяє висувати косовстановлений відвал за межі базової машини на відстань до 1,2 м, не забезпечує ефективного бічного транспортування ґрунту.

Відстань бічного транспортування ґрунту грейдер-елеватором обмежується довжиною конвеєра. Збільшення цього параметра зумовлює зростання матеріалоемності машини й енергоємності робочого процесу, впливає на стійкість. Також різальна система грейдер-елеватора має малу ширину копання ґрунту до 1 м, що потребує збільшення кількості проходів під час будівництва земляної споруди.

Усунути вказаний недолік допоможе застосування у робочому обладнанні землерийно-транспортних машин механічних інтенсифікаторів, які дозволяють підвищити ефективність зовнішнього транспортування ґрунту, знизити опір зусилля копання ґрунту. Тому підвищення ефективності земляних робіт землерийно-транспортних машин із відвальними робочими органами за рахунок упровадження механічних інтенсифікаторів для збільшення відстані та зміни напрямку бічного транспортування ґрунту – це актуальне науково-прикладне завдання в галузі технічних наук.

### Аналіз публікацій

Один із напрямів удосконалення робочого обладнання машини для земляних робіт – інтенсифікація їх робочих процесів. Сучасні технічні рішення інтенсифікаторів використовують коливання високої частоти, ультразвук, вибухові та ударні ефекти, змащення поверхні тертя ґрунту стислим повітрям. Але через складності їх конструктивної реалізації, виникнення додаткових динамічних навантажень на робоче обладнання, необхідність установа додаткового силового обладнання вони не отримали широкого впровадження. Наразі більш ефективне

застосування на ЗТМ МІ переважно у вигляді додаткових транспортувальних пристроїв для завантаження ковша скрепера, збільшення об'єму призми волочіння у машинах із відвальним робочим органом [1–3].

### Виклад основного матеріалу

Запропоноване технічне рішення відвального робочого органа з механічним інтенсифікатором для бічного транспортування ґрунту (рис. 1) має косовстановлений відвал 1 з різальним ножем 2 та криволінійною відвальною поверхнею 3, штовхальні бруси 4, гідроциліндри керування 5. До бічної стінки відвала 1 за допомогою кронштейна 6 закріплений лопатевий металник 7, так, що його вісь обертання 8 збігається з напрямом криволінійної відвальної поверхні 3. Привід металника 7 складається з редуктора 9 та гідродвигуна 10.

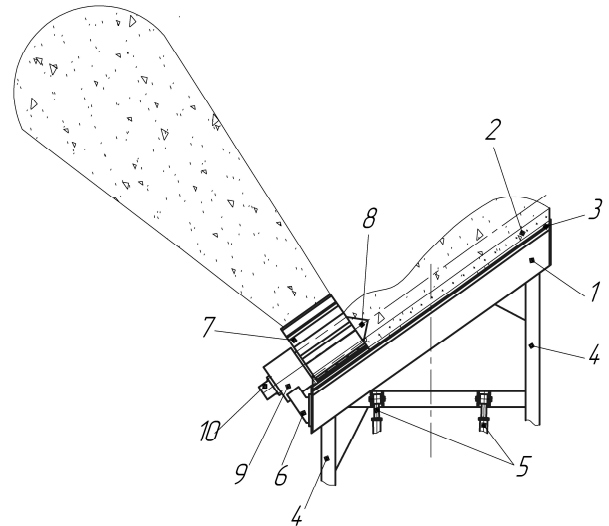


Рис. 1. Відвальний робочий орган із механічним інтенсифікатором для бічного транспортування ґрунту / Fig. 1. Depleted working organ with mechanical intensification for the lateral transportation of soil

Під час роботи робочого органа ґрунт, що зрізується ножем 2, підіймається по відвальній поверхні 3 й одночасно з цим рухається вздовж відвала у бік металника 7. Після досягнення ґрунтом металника 7 він захоплюється його лопатями та кидається у напрямі, перпендикулярному до осі обертання. Оскільки відвал 1 і вісь обертання 8 розташовані під кутом до напрямку руху робочого обладнання, кидання ґрунту відбувається за межі ширини смуги копання.

Для підтвердження працездатності запропонованої конструкції виготовлено фізичну модель косовстановленого відвала з лопатевим металником у масштабі 1 : 5 відносно натурального зразка косовстановленого відвала, що використовується на базовому тракторі тягового класу 10 кН (рис. 2). Модель випробували на

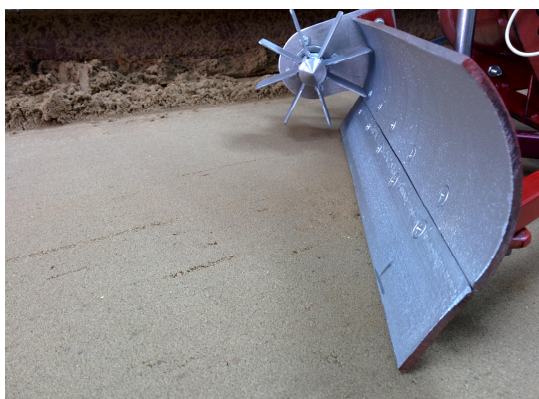
лабораторному стенді для дослідження робочого обладнання землерийно-транспортних машин кафедри будівельних та дорожніх машин ДВНЗ ЦДАБА. Копання ґрунту моделлю підтвердило працездатність запропонованого технічного рішення; встановлені такі особливості робочого процесу:

– різання ґрунту здійснюється повною довжиною різального ножа під кутом до напрямку руху робочого обладнання з постійною товщиною;

– об'єм призми волочіння, відповідно її висота, поступово збільшується у напрямі переміщення ґрунту вздовж відвала;

– ґрунт, що зрізується у зоні розташування металника, безпосередньо захоплюється ним, обминаючи призму волочіння.

На початку теоретичних досліджень отримано математичну модель для визначення горизонтальної складової опору копанню ґрунту косовстановленим відвалом із металником у напрямі руху робочого обладнання. Застосовано математичні моделі для визначення складових опор копанню відвальним робочим органом, що отримані на підставі теорії граничного стану ґрунту і статичного середовища [4].



а



б (b)

Рис. 2. Експериментальне дослідження фізичної моделі косовстановленого відвала з лопатевим металником: а – загальний вигляд фізичної моделі; б – робочий процес / Fig. 2. Experimental study of physical models of the blade with the blade thrower: a – General view of the physical model; b – workflow

Кінцева математична модель для визначення горизонтальної складової опору копанню ґрунту косовстановленим відвалом із металником з урахуванням опору різанню ґрунту, опору призми волочіння та горизонтальної складової опору підйому пласта по відвальній поверхні має вигляд:

$$\begin{aligned}
 W_k = & \left( \sin \varphi_{3x} + \operatorname{tg} \delta \cdot \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \alpha_p} - \sin^2 \varphi_{3x}} \right) \cdot A_1 \cdot L \cdot h \cdot \left[ \frac{\gamma \cdot g \cdot h}{2} + C_w \cdot \operatorname{ctg} \rho + \frac{\sin \alpha_p}{K_\psi \cdot h} \times \right. \\
 & \times \left. (\operatorname{tg} \delta + \operatorname{tg} \rho) \cdot \gamma_p \cdot g \cdot \cos^2 \rho \cdot H_{cp}^2 \cdot K \cdot \arcsin \frac{1}{2 \cdot K} \cdot \left( 1 + \operatorname{tg} \delta \cdot \arcsin \frac{1}{2 \cdot K} \right) + \gamma_p \cdot g \cdot H_{cp} \right] + \\
 & + \gamma_p \cdot g \cdot \cos^2 \rho \cdot \frac{(L - B_m) \cdot H_{cp}^2}{2} + \gamma_p \cdot g \cdot \cos \varphi_{3x} \cdot \cos \alpha_p \cdot \cos^2 \rho \cdot H_{cp}^2 \cdot (L - B_m) \times \\
 & \times \left[ (\operatorname{tg} \rho + \operatorname{tg} \delta) \cdot H_{cp} \cdot K \arcsin \frac{1}{2 \cdot K} \cdot \left( 1 + \operatorname{tg} \delta \cdot \arcsin \frac{1}{2 \cdot K} \right) + K_\psi \cdot h \right], \quad (1)
 \end{aligned}$$

де  $\varphi_{3x}$  – кут захвату відвала;  $\alpha_p$  – кут різання ґрунту;  $\delta$  – кут зовнішнього тертя ґрунту;  $\rho$  – кут внутрішнього тертя ґрунту;  $L$  – довжина

різального ножа;  $h$  – глибина різання ґрунту;  $C_w$  – зчеплення ґрунту;  $\gamma$  – густина суцільного ґрунту;  $\gamma_p$  – густина розпушеного ґрунту;

$B_m$  – ширина металника;  $H_{cp}$  – середня висота призми волочиння;  $A_1$  – коефіцієнт, який визначається аналітично залежно від кута різання ґрунту  $\alpha_p$ .

Значення коефіцієнтів дорівнюють:

$$K_\psi = \frac{tg\alpha_p + tg\psi}{tg\alpha_p \cdot tg\psi}; \quad K = \frac{R}{H_\epsilon}$$

де  $\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}$  – кут зсуву;  $R$  – радіус кривизни лобової поверхні відвала;  $H_\epsilon$  – висота відвала.

Середня висота призми волочиння:

$$H_{cp} = \sqrt{0,5 \cdot h \cdot (L - B_m) \cdot tg\rho}. \quad (2)$$

Розрахункова схема для визначення геометричних параметрів процесу транспортування ґрунту косовстановленим відвалом із лопатевим металником показана на рисунку 3.

Кут взаємодії металника із ґрунтом дорівнює:

$$\alpha_0 = \pi - \rho + \arctg \frac{H_{max} - R}{R} - \arctg \left[ \left( 1 - \frac{H_{max}}{R} \right) \cdot \cos \rho + \sin \rho \cdot \cos \left( \arctg \frac{H_{max} - R}{R} \right) \right]. \quad (3)$$

Кутіві параметри взаємодії металника з ґрунтом дорівнюють:

$$\beta_1 = \arctg \frac{H_{max} - R}{R};$$

$$\theta = \arcsin \left[ \left( 1 - \frac{H_{max}}{R} \right) \cdot \cos \rho + \cos \beta_1 \cdot \sin \rho \right];$$

$$\beta_2 = \frac{\pi}{2} - (\theta + \rho); \quad \alpha_0 = \frac{\pi}{2} + \beta_1 + \beta_2.$$

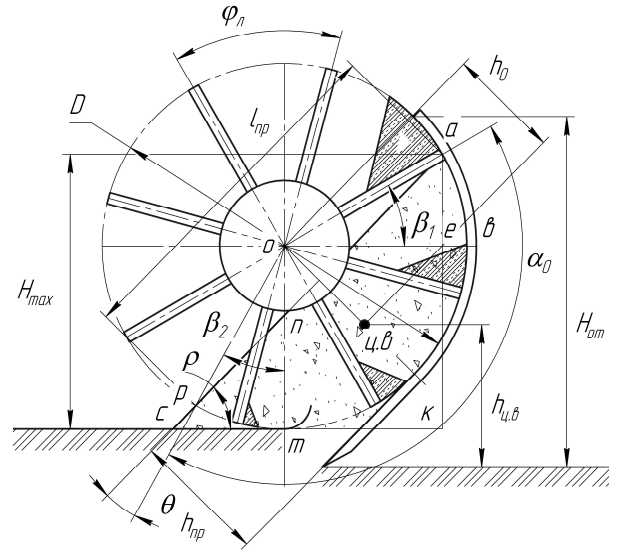


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення геометричних параметрів процесу транспортування ґрунту косовстановленим відвалом із лопатевим металником / Fig. 3. Design model for determining geometric parameters of the transportation process of soil coustenoble blade with blade thrower

Довжина межі вільної поверхні призми волочиння, що перебуває у взаємодії з металником, дорівнює:

$$l_{np} = H_{max} \cdot ctg\rho - \frac{H_{max} - R \cdot \cos \beta_1 \cdot tg\rho}{\sin \rho} + \frac{R \cdot \sin \beta_2}{\cos \rho}. \quad (4)$$

Висота:

$$h_{np} = R - 0,5\sqrt{4R^2 - l_{np}^2}. \quad (5)$$

Площа поперечного перерізу призми волочиння, що захоплюється металником:

$$F_{np} = 0,5 \left[ R^2 \cdot \alpha_0 + l_{np} \cdot (R - h_{np}) \right]. \quad (6)$$

Відстань між віссю обертання металника та центром ваги поперечного перерізу призми волочиння:

$$h_0 = \frac{l_{np}^2}{12F_{np}}. \quad (7)$$

Висота розташування центра ваги ґрунту у призмі волочиння, що потрапляє на металник:

$$h_{цв} = R - h_0 \cdot \cos(0,5\alpha_0 - \beta_2). \quad (8)$$

Об'єм ґрунту, що міститься на лопаті металника під час взаємодії її з призмою волочиння, складається з двох частин:

$$V_l = V_1 + V_2, \quad (9)$$

де  $V_1$  – об'єм ґрунту, що потрапляє на лопать з призми волочиння під час її повороту на кут транспортування  $\alpha_0$ ;  $V_2$  – об'єм ґрунту, що потрапляє на лопать безпосередньо з різального ножа відвала по ширині металника.

Для обчислення  $V_1$  потрібно врахувати, що швидкість руху ґрунту призми волочиння у напрямі металника перпендикулярна площі його обертання. У зв'язку із цією особливістю ширина стружки, що зрізується бічною частиною лопати з призми волочиння, дорівнює шляху, який проходить ґрунт призми волочиння за проміжок часу  $t_l = \varphi_l / \omega_0$ , де  $\varphi_l$  – кутовий крок установлення лопатей металника;  $\omega_0$  – кутова швидкість обертання металника. Тому шлях ґрунту за час  $t_l$  дорівнює ширині стружки  $S$ , а саме:

$$S = V_g \cdot \frac{\varphi_l}{\omega_0}, \quad (10)$$

де  $V_g$  – швидкість переміщення ґрунту вздовж лобової поверхні косовстановленого відвала:

$$V_g = V_{\text{б.м.}} \cdot \sin \varphi_{\text{зх}}, \quad (11)$$

де  $V_{\text{б.м.}}$  – швидкість переміщення базової машини.

З урахуванням виразів (6), (10), (11) об'єм  $V_1$  дорівнює:

$$V_1 = F_{\text{пр.}} \cdot V_{\text{б.м.}} \cdot \sin \varphi_{\text{зх}} \cdot \frac{\varphi_l}{\omega_0}. \quad (12)$$

Визначаючи об'єм  $V_2$ , вважаємо, що він потрапляє на лопать із зони різання ґрунту за час  $t_l$  і тому буде дорівнювати:

$$V_2 = B_m \cdot h \cdot V_{\text{б.м.}} \cdot \frac{\varphi_l}{\omega_0}. \quad (13)$$

Загальний об'єм ґрунту на лопаті на початку процесу метання:

$$V_l = (F_{\text{пр.}} \cdot \sin \varphi_{\text{зх}} + B_m \cdot h) \cdot V_{\text{б.м.}} \cdot \frac{\varphi_l}{\omega_0}. \quad (14)$$

Розрахункова схема визначення геометричних параметрів об'єму ґрунту на лопаті на початку метання металником показана на рисунку 4.

Розглянемо умову рівноваги частки ґрунту на вільній поверхні максимального об'єму ґрунту на лопаті, розташованій від вісі обертання на відстані  $R_i$  під кутом  $\varphi_i$  до поверхні лопаті.

Рівняння рівноваги в координатних осях  $XY$  мають такий вигляд:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0; F_{\text{мп}} + F_{\text{цб}} \cdot \cos \lambda_i - G \cdot \cos \theta_i = 0; & (15) \\ \sum F_y = 0; N - F_{\text{цб}} \cdot \sin \lambda_i - G \cdot \sin \theta_i = 0, & (16) \end{cases}$$

де  $F_{\text{цб}} = m \cdot \omega_0^2 \cdot R_i$  – відцентрова сила, що діє на частку ґрунту;  $G = m \cdot g$  – вага частки;  $F_{\text{мп}} = N \cdot \text{tg} \rho$  – сила тертя частки по вільній поверхні ґрунту;  $\lambda_i, \theta_i$  – кути, що визначають положення векторів  $G$  та  $F_{\text{цб}}$ .

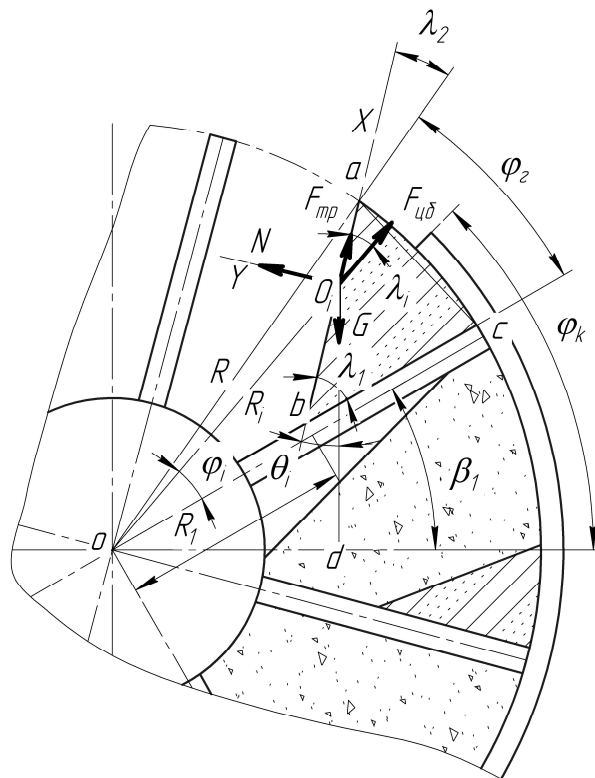


Рис. 4. Розрахункова схема визначення геометричних параметрів об'єму ґрунту на лопаті на початку метання / Fig. 4. Calculation scheme of determination of geometrical parameters of the volume of soil on the blade at the beginning of the throwing

Після перетворень системи рівнянь (15), (16) можна отримати рівність:

$$\frac{\omega_0^2 \cdot R_i}{g} = \frac{\cos(\theta_i + \rho)}{\cos(\lambda_i - \rho)}. \quad (17)$$

З урахуванням того, що кут

$$\theta_i = \frac{\pi}{2} - (\beta_1 + \varphi_i + \lambda_1), \text{ рівність (17) має}$$

вигляд:

$$\frac{\omega_0^2 \cdot R_i}{g} = \text{tg}(\lambda_i - \rho) \cdot \cos(\beta_1 + \varphi_i) + \sin(\beta_1 + \varphi_i). \quad (18)$$

При  $R_i = R_1$  та  $\varphi_i = 0$  вираз (18) має вигляд:

$$\frac{\omega_0^2 \cdot R_1}{g} = \operatorname{tg}(\lambda_1 - \rho) \cdot \cos \beta_1 + \sin \beta_1. \quad (19)$$

Звідки кут  $\lambda_1$  дорівнює:

$$\lambda_1 = \operatorname{arctg} \left( \frac{\omega_0^2 \cdot R_1}{g \cdot \cos \beta_1} - \operatorname{tg} \beta_1 \right) + \rho. \quad (20)$$

При  $R_i = R$  та  $\varphi_i = \varphi_2$  вираз (18) має такий вигляд:

$$\frac{\omega_0^2 \cdot R}{g} = \operatorname{tg}(\lambda_2 - \rho) \cdot \cos(\beta_1 + \varphi_2) + \sin(\beta_1 + \varphi_2). \quad (21)$$

З виразу (20) значення кута  $\lambda_2$  дорівнює:

$$\lambda_2 = \operatorname{arctg} \left[ \frac{\omega_0^2 \cdot R}{g \cdot \cos(\beta_1 + \varphi_2)} - \operatorname{tg}(\beta_1 + \varphi_2) \right] + \rho. \quad (22)$$

Із трикутника  $oab$   $\varphi_2 = \lambda_1 - \lambda_2$  і тоді з урахуванням формул (20) та (22) кут  $\varphi_2$  дорівнює:

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg} \left( \frac{\omega_0^2 \cdot R_1}{g \cdot \cos \beta_1} - \operatorname{tg} \beta_1 \right) - \operatorname{arctg} \left[ \frac{\omega_0^2 \cdot R}{g \cdot \cos(\beta_1 + \varphi_2)} - \operatorname{tg}(\beta_1 + \varphi_2) \right]. \quad (23)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_2 &= \arcsin \frac{2 \cdot V_{л} \cdot \omega_0}{V_{\epsilon} \cdot \alpha_0 \cdot R \cdot (R - R_1)}; \end{aligned} \right. \quad (27)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_2 &= \operatorname{arctg} \left( \frac{\omega_0^2 \cdot R_1}{g \cdot \cos \beta_1} - \operatorname{tg} \beta_1 \right) - \operatorname{arctg} \left[ \frac{\omega_0^2 \cdot R}{g \cdot \cos(\beta_1 + \varphi_2)} - \operatorname{tg}(\beta_1 + \varphi_2) \right] \end{aligned} \right. \quad (28)$$

Розрахункова схема процесу метання ґрунту показана на рисунку 5.

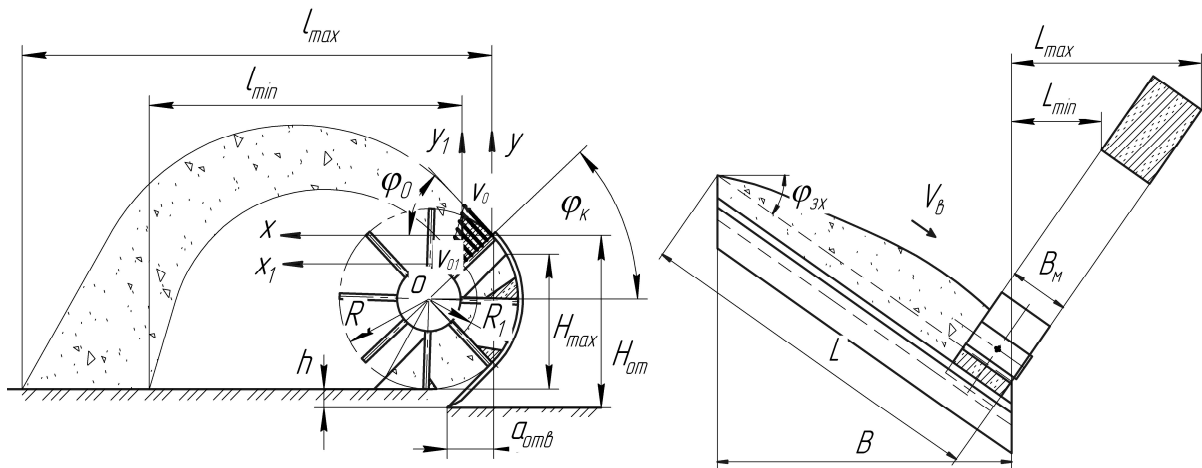


Рис. 5. Розрахункова схема процесу метання ґрунту / Fig. 5. Calculation scheme of the process of throwing the soil

Площа радіального перерізу об'єму ґрунту на лопаті з трикутника  $abc$ :

$$F = 0,5R \cdot (R - R_1) \cdot \sin \varphi_2, \quad (24)$$

звідки:

$$\varphi_2 = \arcsin \frac{2 \cdot F}{R \cdot (R - R_1)}. \quad (25)$$

З іншого боку площу  $F$  можна виразити через об'єм ґрунту  $V_{л}$  на лопаті за формулою (14), швидкість переміщення ґрунту вздовж відвала  $V_{\epsilon}$  за рівністю (11) та час повороту  $t = \alpha_0 / \omega_0$  метальника на кут  $\alpha_0$ . Тоді значення:

$$F = \frac{V_{л} \cdot \omega_0}{V_{\epsilon} \cdot \alpha_0}. \quad (26)$$

З урахуванням (24) кут  $\varphi_2$  дорівнює:

$$\varphi_2 = \arcsin \frac{2 \cdot V_{л} \cdot \omega_0}{V_{\epsilon} \cdot \alpha_0 \cdot R \cdot (R - R_1)} = f(R_1). \quad (27)$$

Таким чином залежності (23) і (26) утворюють наступну систему рівнянь для визначення відстані  $R_1$ :

Ґрунт на лопаті перед початком метання міститься між зовнішнім радіусом  $R$  та внутрішнім  $R_1$  і відповідно на цих відстанях початкова швидкість метання ґрунту дорівнює  $V_0 = \omega_0 \cdot R$  та  $V_{01} = \omega_0 \cdot R_1$ .

$$l_{\max} = \frac{V_0 \cdot \cos \varphi_0 \cdot \left[ V_0 \cdot \sin \varphi_0 + \sqrt{V_0^2 \cdot \cos^2 \varphi_0 + 2 \cdot g \cdot (H_{om} - h)} \right]}{g}, \quad (29)$$

$$l_{\min} = \frac{V_{01} \cdot \cos \varphi_0 \cdot \left[ V_{01} \cdot \sin \varphi_0 + \sqrt{V_{01}^2 \cdot \cos^2 \varphi_0 + [H_{om} - h - (R - R_1) \cdot g \cdot \cos \varphi_0]} \right]}{g}. \quad (30)$$

Максимальна та мінімальна відстані бічного транспортування ґрунту відносно різального ножа косовстановленого відвала відповідно дорівнюють:

$$L_{\max} = (l_{\max} - a_{om}) \cdot \sin \varphi_{zx}; \quad (31)$$

$$L_{\min} = [l_{\min} - a_{омв} + (R - R_1) \cdot \sin \varphi_0] \cdot \sin \varphi_{zx}. \quad (32)$$

Для визначення енергетичних показників робочого процесу розглянемо баланс потужності бульдозерного обладнання, який має вигляд:

$$N = N_k + N_n + N_p + N_{тр}, \quad (33)$$

де  $N_k$  – потужність на копання ґрунту косовстановленим відвалом, кВт;  $N_n$  – потужність на підйом ґрунту, кВт;  $N_p$  – потужність на розгін ґрунту, кВт;  $N_{тр}$  – потужність на подолання сил тертя по лобовій поверхні відвала під час транспортування ґрунту металником, кВт.

Витрати потужності на копання ґрунту дорівнюють:

$$N_k = \frac{\Pi_m \cdot E_k}{1000}, \quad (34)$$

де  $\Pi_m$  – теоретична продуктивність бульдозерного відвала у цілому,  $\Pi_m = L \cdot h \cdot V_{\text{бм}} \cdot \cos \varphi_{zx}$ , м<sup>3</sup>/с;  $E_k$  – енергоємність процесу копання, Н/м<sup>2</sup>.

Витрати потужності на підйом ґрунту містять дві складові:

$$N_n = N_1 + N_2, \quad (35)$$

де  $N_1$  – витрати потужності на підйом ґрунту, який подається на металник із призми волочіння;  $N_2$  – витрати потужності на підйом ґрунту, який зрізується різальним ножом відвала по ширині металника  $B_m$ .

Потужність  $N_1$  дорівнює:

Із рівнянь руху часток ґрунту на відстанях  $R$  та  $R_1$  відповідно максимальна  $l_{\max}$  та мінімальна відстані  $l_{\min}$  метання дорівнюють:

$$N_1 = \frac{\Pi_{m1} \cdot g \cdot \gamma_p \cdot K_p \cdot (H_{\max} - h_{ye})}{1000}, \quad (36)$$

де  $\Pi_{m1} = (L - B_m) \cdot h \cdot V_{\text{бм}} \cdot \cos \varphi_{zx}$  – продуктивність бульдозерного обладнання по ґрунту, який потрапляє після його різання у призмі волочіння;  $\gamma_p$  – густина розпушеного ґрунту;

$K_p$  – коефіцієнт розпушення ґрунту.

Потужність  $N_2$  дорівнює:

$$N_2 = \frac{\Pi_{m2} \cdot g \cdot \gamma_p \cdot K_p \cdot H_{\max}}{1000}, \quad (37)$$

де  $\Pi_{m2} = B_m \cdot h \cdot V_{\text{бм}} \cdot \cos \varphi_{zx}$  – продуктивність бульдозерного обладнання по ґрунту, який потрапляє після його різання безпосередньо на металник.

Витрати потужності на розгін ґрунту:

$$N_p = \Pi_m \cdot \gamma_p \cdot K_p \cdot \frac{\omega_0^2 \cdot R_c^2}{2000}, \quad (38)$$

де  $R_c$  – відстань між віссю обертання та центром ваги об'єму ґрунту на лопаті в момент початку метання;  $\omega_0$  – кутова швидкість обертання металника.

Для визначення витрат потужності на подолання сил тертя ґрунту по лобовій поверхні відвала, враховуємо, що об'єм ґрунту на лопатях металника є змінною величиною. В момент початку занурення лопатей у призму волочіння об'єму ґрунту на них  $V_l = 0$  і досягає максимального значення під час виходу лопатей з призми волочіння перед початком метання. Тому для розрахунку сил тертя ґрунту по лобовій поверхні приймемо середнє значення об'єму ґрунту  $V_{л.ср} = 0,5V_l$ , де  $V_l$  визначається згідно з формулою (14).

Середнє значення маси ґрунту:

$$m_{л.ср} = 0,5 \cdot \gamma_p \cdot V_l. \quad (39)$$



Відцентрова сила, що діє на масу  $m_{л.ср}$ :

$$F_{вц} = 0,5 \cdot \gamma_p \cdot V_l \cdot \omega_0^2 \cdot R_{с.ср}, \quad (40)$$

де  $R_{с.ср}$  – відстань між віссю обертання та центром ваги середнього об'єму ґрунту на лопаті приймаємо  $R_{с.ср} = R$ .

Сила тертя між середнім об'ємом ґрунту та лобовою поверхнею відвала:

$$F_{тр} = 0,5 \cdot \gamma_p \cdot V_l \cdot \omega_0^2 \cdot R_{с.ср} \cdot tg \delta, \quad (41)$$

Момент сил тертя:

$$M_{тр} = 0,5 \cdot \gamma_p \cdot V_l \cdot \omega_0^2 \cdot R_{с.ср}^2 \cdot tg \delta. \quad (42)$$

Потужність  $N_{тр}$  визначається як:

$$N_{тр} = \frac{\gamma_p \cdot V_l \cdot \omega_0^3 \cdot R_{с.ср} \cdot tg \delta}{2000}. \quad (43)$$

Повна енергоємність робочого процесу,

кВт·с/м<sup>3</sup>:

$$E = \frac{N}{L \cdot h \cdot V_{бм} \cdot \cos \varphi_{zx}}. \quad (44)$$

### Висновок

Результатами випробувань у лабораторних умовах фізичної моделі запропонованої конструкції відвального робочого органа з механічним інтенсифікатором у вигляді лопатевого металника підтверджено його працездатність та з'ясовано фізичну сутність робочого процесу. Виконані теоретичні дослідження робочого процесу копання ґрунту дозволили отримати математичні моделі для визначення геометричних, кінематичних та силових параметрів робочого обладнання та розробки методики його інженерного розрахунку.

### ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Интенсификация земляных работ в дорожном строительстве : монография / [В. И. Баловнев, Л. А. Хмара]. – Москва : Транспорт, 1983. – 384 с.
2. Модернізація та підвищення продуктивності будівельних машин : монографія / [Л. А. Хмара, М. П. Колісник, В. П. Станевський]. – Київ : Будівельник, 1992. – 152 с.
3. Интенсификация разработки грунтов в дорожном строительстве : монография / В. И. Баловнев, Л. А. Хмара. – Москва: Транспорт, 1993. – 383 с.
4. Баловнев В. И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин : монография / В. И. Баловнев. – Москва : Машиностроение, 1994. – 432 с.
5. Голубченко О. І. Тенденції вдосконалення конструкції відвальних робочих органів для збільшення об'єму призми волочіння / О. І. Голубченко, М. Е. Хожило // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2008. – № 6–7. – С. 42–46.
6. Голубченко О. І. Розробка робочого обладнання землерійно-транспортної машини безперервної дії / Голубченко О. І., Хожило М. Е. // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. – Вып. 51. – 2009. – С. 110–113.
7. Голубченко О. І. Кінематичні особливості процесу транспортування ґрунту гвинтовим робочим органом різально-кидального типу для землерійно-транспортних машин безперервної дії / О. І. Голубченко, М. Е. Хожило // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. – Вып. 57. – 2010. – С. 36–45.
8. Голубченко О. І. Огляд та пропозиції конструкцій активного робочого обладнання землерійно-транспортних машин безперервної дії / О. І. Голубченко, М. Е. Хожило // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2011. – № 6–7. – С. 48–55.
9. Голубченко О. І. Конструкції та застосування різально-метальних органів для інтенсифікації робочих процесів землерійно-транспортних машин / О. І. Голубченко // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. – Вып. 66. – 2012. – С. 296–302.

### REFERENCES

1. Balovnev V.I. and Khmara L.A. *Intensifikatsiya zemlyanykh rabot v dorozhnom stroitelstve* [Intensification of earthmovings is in travelling building]. Moscow : Transport Publ., 1983, 384 p. (in Russian).
2. Khmara L.A., Kolisnik M.P. and Stanevskiy V.P. *Modernizatsiya ta pidvischennya produktivnosti budivelnykh mashin* [Modernisation and increase of the productivity of building machines]. Kiyv : Budivelnik Publ., 1992, 152 p. (in Ukrainian).
3. Balovnev V.I. and Khmara L.A. *Intensifikatsiya razrabotki gruntov v dorozhnom stroitelstve* [Intensification of development of soils is in travelling building]. Moscow : Transport Publ., 1993, 383 p. (in Russian).
4. Balovnev V.I. *Modelirovanie protsessov vzaimodeystviya so sredoy rabochih organov dorozhno-stroitelnykh mashin* [Design of processes of co-operating with the environment of working organs of trailbuilders]. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1994, 432 p. (in Russian).
5. Golubchenko O.I. and Hozhilo M.E. *Tendentsiyi vdoskonalennya konstruksiyi vidvalnykh robochih organiv dlya zbilshennya ob'emu prizmi volochinnya* [Tendency of improving structures of blade working members for increasing the volume of draving

prism]. *Visnik Pridniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnitstva ta arhitekturi* [Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2008, no. 6–7, pp. 42–46. (in Ukrainian).

6. Golubchenko O.I. and Hozhilo M.E. *Rozrobka robochogo obladnannya zemleriyno-transportnoyi mashini bezperervnoyi diyi* [Development of earth-moving machine working equipment of continuous action]. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya: Pod'emno-transportnyie, stroitelnyie i dorozhnyie mashinyi i oborudovanie* [Construction. Material Sciences. Mechanical Engineering. Series: Lifting, building and road machines and equipment]. Vol. 51, 2009, pp. 110–113. (in Ukrainian).

7. Golubchenko O.I. and Hozhilo M.E. *Kinematichni osoblivosti protsesu transportuvannya gruntu gvintovim robochim organom rizalno-kidalnogo tipu dlya zemleriyno-transportnih mashin bezperervnoyi diyi* [Kinematics features of process of transporting of soil by the spiral working organ of cutting-missile type for earth-moving-transport machines of continuous action]. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya: Pod'emno-transportnyie, stroitelnyie i dorozhnyie mashinyi i oborudovanie* [Construction. Material Sciences. Mechanical Engineering. Series: Lifting, building and road machines and equipment]. Vol. 57, 2010, pp. 36–45. (in Ukrainian).

8. Golubchenko O.I. and Hozhilo M.E. *Oglyad ta propozitsiyi konstruksiy aktivnogo robochogo obladnannya zemleriyno-transportnih mashin bezperervnoyi diyi* [Review and suggestions of constructions of active working equipment of earth-moving-transport machines of continuous action]. *Visnik Pridniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnitstva ta arhitekturi* [Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2011, no. 6–7, pp. 48–55. (in Ukrainian).

9. Golubchenko O.I. *Konstruksiyi ta zastosuvannya rizalno-metalnih organiv dlya intensifikatsiyi robochih protsesiv zemleriyno-transportnih mashin* [Constructions and applications of cutting-missile organs are for intensification of working processes of earth-moving-transport machines]. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya: Pod'emno-transportnyie, stroitelnyie i dorozhnyie mashinyi i oborudovanie* [Construction. Materials Sciences. Mechanical Engineering. Series: Lifting, building and road machines and equipment]. Vol. 66, 2012, pp. 296–302. (in Ukrainian).

*Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. В. Г. Заренбіним (Україна); д-ром техн. наук, проф. С. В. Шатовим (Україна)*

Стаття рекомендована до друку 01.11.2016 р

Прийнята до друку 07.11.2016