

УДК 621.872

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300819.80.514

НАУКОВІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІННОВАЦІЙНОГО ТЕЛЕСКОПІЧНОГО РОБОЧОГО ОРГАНА БУЛЬДОЗЕРА (НА ОСНОВІ ЗАГАЛЬНИХ ТЕОРІЙ ВЗАЄМОДІЇ ВІДВАЛЬНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ІЗ СЕРЕДОВИЩЕМ)

ХМАРА Л. А.^{1*}, *д. т. н., проф.*,
КРОЛЬ Р. М.², *к. т. н., доц.*

^{1*} Кафедра будівельних і дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 585-26-59, e-mail: leonidkhmara@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0003-3050-9302

² Кафедра будівельних і дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-73, e-mail: krol.roman2012@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0002-7180-663X

Анотація. *Постановка проблеми.* Процес взаємодії відвальних робочих органів із ґрунтом, що розроблюється, – один із визначальних факторів робочого циклу машин для землерійно-транспортних робіт. Характер процесу суттєво впливає на конструкцію землерійно-транспортних машин. Процесу взаємодії відвального робочого органу машини з ґрунтом залежить від технологічного призначення машини, тобто від виду робіт, що виконуються машиною, фізико-механічних властивостей ґрунту та способу його руйнування, геометричних параметрів робочого органу, параметрів режиму копання (глибини різання, кута різання, кута установки робочого органу в плані і тощо.), які визначають силові та енергетичні параметри робочого процесу машини. Можливість оптимізації геометричних параметрів телескопічного робочого органу бульдозера до різноманітних ґрунтових умов та технологічних операцій дозволить раціонально використовувати тягово-зчіпні характеристики машини, підвищити її продуктивність та універсальність. *Мета статті* – огляд і аналіз існуючих теорій взаємодії відвальних робочих органів із ґрунтом та розроблення, на їх основі, алгоритму оптимізаційного розрахунку геометричних параметрів відвала бульдозера телескопічного типу залежно від ґрунтових умов та тягово-зчіпних характеристик базової машини, визначення його продуктивності під час копанні та транспортування ґрунту. *Висновок.* На основі тягового балансу розроблено алгоритм оптимізації геометричних параметрів відвала бульдозера телескопічного типу за узагальненим критерієм оптимізації P_{NG} залежно від потужності двигуна базової машини та фізико-механічних властивостей середовища, що розроблюється.

Ключові слова: бульдозер; ґрунтові умови; базова машина; дальність транспортування ґрунту; геометричні параметри відвала; оптимізаційний розрахунок; тягово-зчіпні характеристики

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИННОВАЦИОННОГО ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА БУЛЬДОЗЕРА (НА ОСНОВЕ ОБЩИХ ТЕОРИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОТВАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СО СРЕДОЙ)

ХМАРА Л. А.^{1*}, *д. т. н., проф.*,
КРОЛЬ Р. М.², *к. т. н., доц.*

^{1*} Кафедра строительных и дорожных машин, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (067) 585-26-59, e-mail: leonidkhmara@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0003-3050-9302.

² Кафедра строительных и дорожных машин, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского 24-а, 49600, Днiпро, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-73, e-mail: krol.roman2012@gmail.ua, ORCID ID: 0000-0002-7180-663X

Аннотация. *Постановка проблемы.* Процесс взаимодействия отвальных рабочих органов с разрабатываемым ґрунтом является одним из определяющих факторов рабочего цикла машин для землеройно-транспортных работ. Характер процесса значительно влияет на конструкцию землеройно-транспортных машин. Процесс взаимодействия отвального рабочего органа машины с ґрунтом зависит от технологического назначения машины, а именно от вида работ, которые выполняются машиной, физико-механических свойств ґрунта и способа его разрушения, геометрических параметров рабочего органа, параметров режима копания (глубины резания, угла резания, угла установки рабочего органа в плане и т. д.), которые определяют силовые и

энергетические параметры рабочего процесса машины. Возможность оптимизации геометрических параметров телескопического рабочего органа бульдозера к различным грунтовым условиям и технологическим операциям позволит рационально использовать тягово-сцепные характеристики машины, повысить её производительность и универсальность. **Цель статьи** – обзор и анализ существующих теорий взаимодействия отвальных рабочих органов с грунтом и разработка, на их основе алгоритма оптимизационного расчета геометрических параметров отвала бульдозера телескопического типа в зависимости от грунтовых условий и тягово-сцепных характеристик базовой машины, определение его производительности при копании и транспортировании грунта. **Выводы.** На основании тягового баланса разработан алгоритм оптимизации геометрических параметров отвала бульдозера телескопического типа по обобщенному критерию оптимизации Π_{NG} в зависимости от мощности двигателя базовой машины и физико-механических свойств разрабатываемой среды.

Ключевые слова: бульдозер; грунтовые условия; базовая машина; дальность транспортирования грунта; геометрические параметры отвала; оптимизационный расчет; тягово-сцепные характеристики

SCIENTIFIC BASES OF THE OPTIMIZATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF INNOVATIVE TELESCOPIC WORKING BODY OF A BULLDOZER (ON BASIS OF GENERAL THEORIES OF COOPERATION OF DUMP WORKING BODIES WITH ENVIRONMENT)

KHMARA L.A.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KROL R.M.², *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

^{1*} Department of construction and road machinery, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (067) 585-26-59, e-mail: leonidkhmara@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0003-3050-9302.

² Department of construction and road machinery, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (099) 207-87-00, e-mail: krol.roman2012@gmail.ua, ORCID ID: 0000-0002-7180-663X

Abstract. Problem statement. The process of co-operation dump working bodies with the developed soil is one of determinative duty cycle machines for earth-moving transport works. Character passing of process carries out the considerable influence on the construction of earth-moving transport machines. Passing process of cooperation dump working body machine with soil depends on the technological setting machine, namely from a kind of a robot, that is executed by a machine, physical and mechanical properties of soil and method of his destruction, geometrical parameters of working body, parameters of the mode digging (depth of cutting, cutting corner, corner setting of working organ in a plan and etc.), that determine power and power parameters of working process machine. Possibility optimization of geometrical parameters telescopic working body of bulldozer to different ground to the terms and technological operations will allow rationally to use hauling and coupling descriptions of machine, promote her productivity and universality. **Purpose.** There is a review and analysis of existent theories of cooperation of dump working bodies with soil and development, on their basis, algorithm of optimization calculation geometrical parameters of dump bulldozer telescopic type depending on the ground terms and hauling and coupling descriptions of base machine, determination of his productivity at digging and portage soil. **Conclusions.** On the basis of hauling balance the algorithm optimization of geometrical parameters dump bulldozer telescopic type is worked out after the generalized criterion optimization Π_{NG} depending on engine of base machine and physical and mechanical properties of the developed environment power.

Keywords: bulldozer; ground terms; base machine; soil transportation activity, geometrical parameters of dump; optimization calculation; hauling-coupling descriptions

Актуальність проблеми. Можливість адаптації робочих органів землерийно-транспортних машин (ЗТМ) до різноманітних ґрунтових умов та технологічних операцій дозволить раціонально використовувати тягово-зчіпні характеристики машини, підвищити її продуктивність та універсальність.

Аналіз публікацій. Питанням тягових розрахунків ЗТМ присвячені праці М. Г. Домбровського [5], А. М. Зеленина

[6; 7], В. І. Баловнева, І. П. Керова [2; 3], Н. Я. Хархути, М. І. Капустіна, В. П. Семєнова, І. М. Евентова [4], А. М. Холодова [13; 14], Т. В. Алексєєвої, К. А. Артемьєва, А. А. Бромберга [1], Л. А. Хмари [8; 9], Ю. О. Вєтрова [10], але вони не розглянули питання впливу зміни геометричних параметрів робочого органа на тягово-зчіпні характеристики ЗТМ, а також не виконано оптимізаційний розрахунок робочого органа для різних ґрунтових умов.

Мета статті – розроблення алгоритму оптимізаційного розрахунку геометричних параметрів відвала бульдозера телескопічного типу за узагальненим критерієм оптимізації P_{NG} на основі загальних теорій взаємодії відвальних робочих органів із середовищем залежно від ґрунтових умов та тягово-зчіпних характеристик бульдозера.

Основний матеріал. Процес взаємодії з розроблюваним ґрунтом – один із визначальних факторів робочого циклу машин для землерийно-транспортних робіт. Характер процесу суттєво впливає на конструкцію ЗТМ. Процесу взаємодії робочого органа машини із ґрунтом залежить від технологічного призначення машини, тобто від виду робіт, що виконуються машиною, фізико-механічних властивостей ґрунту та способу його руйнування, геометричних параметрів робочого органа, параметрів режиму копання (глибини різання, кута різання, кута установки робочого органа в плані тощо), які визначають силові та енергетичні параметри робочого процесу машини.

Бульдозери класифікують за призначенням, номінальним тяговим зусиллям та різними конструктивними схемами [10]. За призначенням розрізняють бульдозери загального призначення та спеціальні. Перші виконують пошарове різання, набір та переміщення ґрунтів, порід та матеріалів середньої міцності у середніх кліматичних умовах (помірний клімат з температурою від -40°C до $+40^{\circ}\text{C}$).

Економічно вигідна середня дальність транспортування ґрунту бульдозерами загального призначення звичайно не перевищує 60 м. Частіше за все такі бульдозери обладнані неповоротним у горизонтальній площині відвалом.

Другі, бульдозери спеціального призначення, використовуються для виконання окремих видів робіт: прокладення шляхів та доріг, згрібання торфу, розрівнювання кавальєрів, підземної та підводної розробки матеріалів, розробки та переміщення легких і сипких матеріалів типу вугілля та ін., а також для роботи в

особливих кліматичних умовах (наприклад, за низьких температур до -60°C , у сухому та жаркому кліматі пустель, у тропічній місцевості, у небезпечних та загазованих місцях, на ґрунтах із пониженою несною здатністю тощо). На спеціальних бульдозерах встановлюються різноманітні типи відвалів.

За номінальним тяговим зусиллям бульдозери поділяються на надважкі (з номінальним тяговим зусиллям понад 300 кН та потужністю понад 300 кВт), важкі (відповідно 200...300 кН та 184...300 кВт), середні (135...200 кН та 118...183 кВт), легкі (25...135 кН та 43...117 кВт) та малогабаритні (відповідно менше 25 кН та менше 43 кВт).

За конструктивними ознаками бульдозери класифікують за типом ходової частини, робочих органів, рам та управління. За типом ходової частини розрізняють бульдозери гусеничні та колісні. Для розробки міцних ґрунтів використовуються гусеничні бульдозери. За типом робочого органа бульдозери розрізняють (рис. 1):

– з неповоротним (прямим) відвалом, установленим на бульдозері перпендикулярно повздовжній осі машини (кут захвату рівний 90°);

– з неповоротним півсферичним відвалом, вигнуті бокові щитки та ножі якого установлені під невеликим кутом до лобової поверхні;

– з неповоротним сферичним відвалом, що складається з трьох приблизно рівних частин, встановлених під кутом близько 15° один до одного;

– з неповоротним коротким відвалом, обладнаним амортизаторами для зменшення ударних навантажень під час штовхання скреперів;

– з поворотним відвалом, який можна встановлювати в горизонтальній площині під кутом в обидві сторони до повздовжньої осі машини або перпендикулярно до неї;

– універсальні (шляхопрохідники) з шарнірно-зчленованим відвалом із двох частин; кожен частину чи обидві разом можна встановлювати в горизонтальній

площині під кутом до повздожньої осі машини чи перпендикулярно до неї.

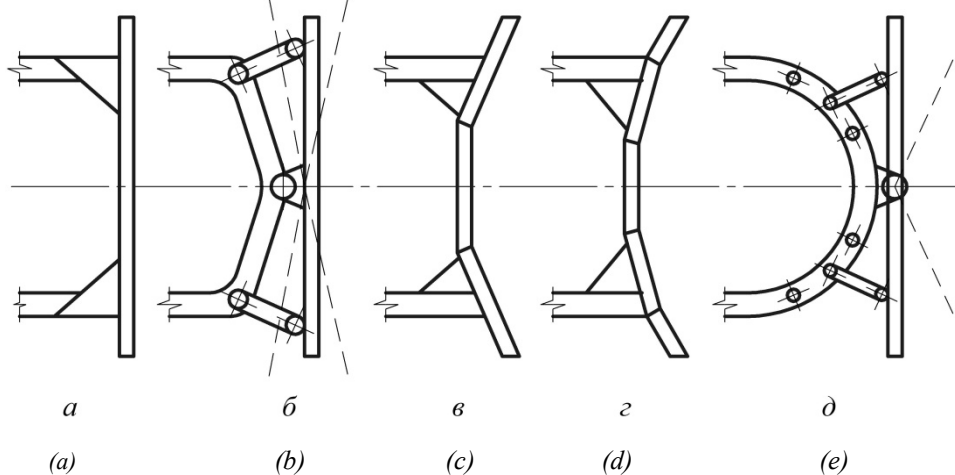


Рис. 1. Конструкції бульдозерних відвалів (вид зверху): а – неповоротний лобовий відвал; б – поворотний в плані відвал; в – півсферичний відвал; г – сферичний відвал великої накопичувальної здатності; д – універсальний шарнірно-зчленований відвал (шляхопрохідник) / Fig. 1. Constructions of bulldozer dumps (kind from above): а – irrevocable frontal dump; b – turning in a plan dump; c – semispherical dump; d – spherical dump of large story ability; e – universal joint - arthrous dump (wayshaft)

Півсферичні та сферичні відвали характеризуються великою утримувальною здатністю завдяки переміщенню призми волочіння збільшеного об'єму, що дозволяє різко підвищити продуктивність бульдозера під час розробки маломіцних ґрунтів.

Всі вказані типи бульдозерів можуть мати пристрій для поперечного перекошу відвала. Перекіс відвала полегшує розробку міцних ґрунтів та порід, нарізання канав та кюветів. Бульдозери з відвалами перших трьох типів інколи мають регулювання кута різання шляхом повороту (нахилу) відвала вперед та назад.

Нині здебільшого використовуються бульдозери з півсферичним неповоротним відвалом та пристроєм для перекошу. Такі бульдозери можна ефективно використовувати для розробки більшості типів ґрунтів. Для розширення області використання бульдозерів на відвал навішується швидкоз'ємне робоче обладнання: гідрокерований щелепний захват із виступаючим середнім ножом [2], рузпушувальні зубці, вилкові захвати, підйомний крюк тощо.

По тину рами розрізняють бульдозери з обхоплювальною та внутрішньою рамою. На разі внутрішню раму використовують тільки для бульдозерів-штовхачів, жорсткість робочого обладнання котрих

повинна бути підвищеною. За типом механізму керування розрізняють бульдозери з гідравлічним та канатно-блочним керуванням, причому останній тип керування все більше виходить із використання.

Підвищення продуктивності бульдозера досягається за рахунок установки на базовий трактор (рис. 2) бульдозерного робочого обладнання, що складається із штовхальних брусів 1, що приварених до основного відвала 2. У внутрішній порожнині основного відвала 2, по обидві його бічні сторони, встановлені, із можливістю осьового переміщення, допоміжні відвали 3. Осьове переміщення допоміжних відвалів 3 здійснюється за допомогою двоштокового гідроциліндра 4, закріпленого на основному відвалі 2 в кронштейнах 5. На внутрішньому боці основного відвала 2 за допомогою болтових з'єднань закріплені напрямні 6, виконані із бронзи, по котрих переміщуються допоміжні відвали 3. У свою чергу, тильний бік допоміжних відвалів 3 має короби 7, 8 та 9 із напрямними 10, 11 та 12. Короби 7, 8 та 9 контактують із відповідними коробами 13, 14 та 15 основного відвала 2.

Така конструкція дозволяє переміщувати допоміжні відвали 2 без значного опору осьового переміщення, а

наявність внутрішніх коробів забезпечує достатню жорсткість основного та допоміжних відвалів за максимального вильоту останніх.

Таке робоче обладнання бульдозера може адаптуватися до різних ґрунтових

умов зміні довжини вильоту допоміжних відвалів за допомогою двоштокового гідроциліндра, що дозволить ефективніше використати тягово-зчіпні характеристики базової машини.

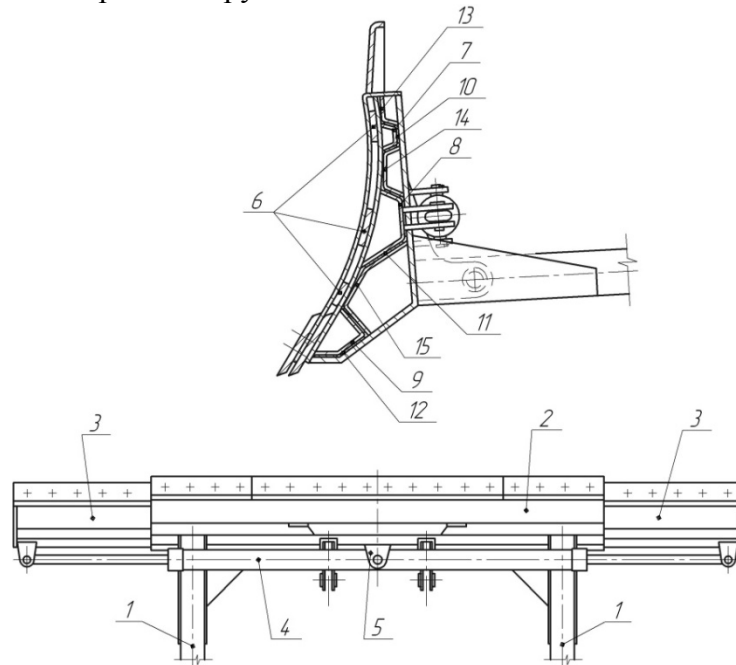


Рис. 2. Конструкція робочого обладнання бульдозера телескопічного типу /
Fig. 2. Construction working equipment of bulldozer telescopic type

Схема процесу взаємодії бульдозерного обладнання з ґрунтом у разі установки відвала в плані під прямим кутом до повздовжньої осі бульдозера наведена на рисунку 3. Під час копання ґрунту, ґрунт набирається бульдозерним відвалом та формуються призми волочіння до початку сталого режиму копання, коли кількість ґрунту, що надходить у призму волочіння, рівна кількості ґрунту, котрий втрачається відвалом у бокові валки. Експериментально встановлено [3], що стружка, котра відділяється від масиву, на початковому етапі за дії відпору ґрунту рухається вгору по відвалу. На останніх етапах різання у верхній частині відвала стружка руйнується на окремі фрагменти, які падають вниз на шари ґрунту, що знову вирізаються та утворюють призму волочіння.

Розрізняють три зони (рис. 3), що характеризують процес взаємодії відвала з ґрунтом [6]. Зона формування стружки 1, що розташовується біля різального краю відвала. Зона 2, яка характеризується рухом

пласту ґрунту по відвалу. Зона 3 визначається як зона руйнування пласта ґрунту та утворення призми волочіння.

Існують різні теорії, що описують процеси різання ґрунту плоским ножом та копання ґрунту відвалом бульдозера. Широко використовуються для визначення зусиль копання ґрунту відвальними робочими органами формули, отримані академіком В. П. Горячкіним, професорами В. І. Баловневим, Ю. О. Ветровим, А. Н. Зеленіним, к. т. н. А. А. Яркіним та ін.

Академік В. П. Горячкін запропонував формулу для визначення зусилля різання ґрунту [12]:

$$T_p = G \cdot f + K \cdot a \cdot b + \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot g_m^2,$$

де G – сила тяжіння плуга; f – коефіцієнт тертя ножа по ґрунту; K – питомий опір різанню, який залежить від міцності ґрунту; a, b – відповідно глибина та ширина різання; ε – коефіцієнт пропорційності; g_m – швидкість різання.

Перший член формули характеризує процес тертя, другий член – процес руйнування масиву ґрунту, третій член – інерційні сили перевертання та відкидання пласта ґрунту. Ця формула призначена для розрахунку сільськогосподарських плугів із середньою глибиною різання $a = 0,15 \dots 0,2$ м та співвідношенням геометричних параметрів різання $b = 1,5 \cdot a$, що обмежує можливість її використання для розрахунку зусиль копання ґрунту робочими органами землерийно-транспортних машин.

На рисунку 4 подано розрахункову схему для визначення опору копанню ґрунту неповоротним відвалом бульдозера на кінцевому етапі копання, яку запропонував д. т. н., професор В. І. Баловнєв [3].

Горизонтальна складова опору копанню для плоского ножа з циліндричним відвалом постійної кривизни на основі прийнятої схеми в загальному вигляді визначається за формулою:

$$P_T = P_p + P_{np} + P_{гор}$$

де P_p – опір різанню з урахуванням опору руху пласта по відвалу та опору бокових ножів; P_{np} – опір призми волочіння з урахуванням впливу горизонтальної складової сил, що згинають пласт (останньою можна знехтувати); $P_{гор}$ – горизонтальна складова опору підйому пласта.

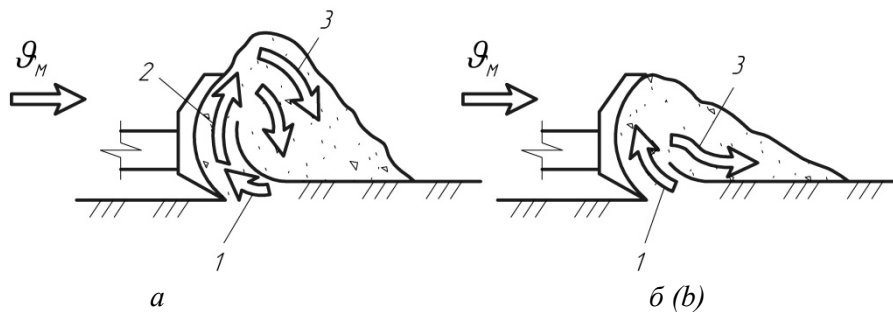


Рис. 3. Схема руху ґрунту перед відвалом бульдозера: а – зв’язний ґрунт; б – незв’язний ґрунт; 1 – зона формування стружки; 2 – зона руху пласта ґрунту по відвалу; 3 – зона руйнування пласта ґрунту та утворення призми волочіння / Fig. 3. Chart motion of soil before dump of bulldozer: a – coherent soil; b – incoherent soil; 1 – zone of forming shaving; 2 – zones motion layer of soil are on dump; 3 – zones destruction layer of soil and formation prism dragging

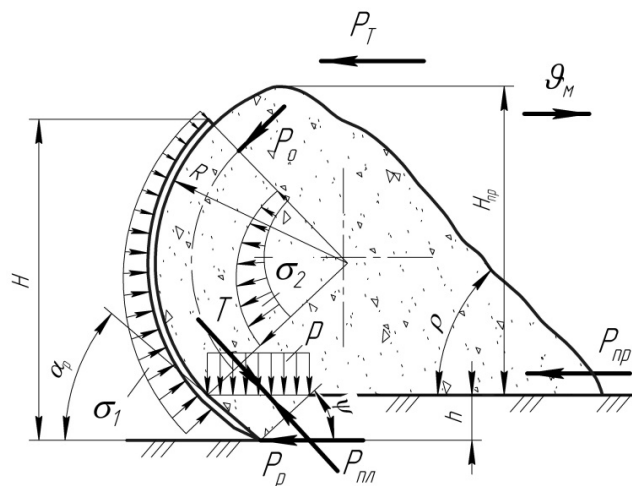


Рис. 4. Розрахункова схема для визначення опору копанню ґрунту відвалом бульдозера / Fig. 4. Calculation chart for determination resistance digging of soil by the dump bulldozer

Ґрунт, що вирізується плоским ножом із масиву (рис. 4) у вигляді стружки, яка згинається та переміщується вгору по відвалу, проходячи через призму волочіння по шляху найменшого опору. Пасивний тиск з боку призми волочіння визначає дію на стружку ґрунту нормальних сил ΔN , розподілених по поверхні тертя та, у свою чергу, характеризує сили тертя T_1 та T_2 . Сумарна дія цих сил тертя та власної ваги стружки ґрунту характеризує опір T руху стружки вгору по відвалу. Одночасно опір T діє зверху у вигляді розподіленого тиску P на елемент ґрунту, що відділяється плоским ножом від масиву, який намагається зсунути уперед та вгору під кутом зсуву ψ . Таким чином, сила переміщення ґрунту вгору по відвалу одночасно впливає на силу різання (відокремлення ґрунту від масиву).

При $K = R/H \geq 0,9 \dots 1,1$, де R – радіус кривизни відвала; H – висота відвала, маємо:

$$P_p = (1 + ctg\alpha_p \cdot tg\delta) \cdot A_1 \cdot B \cdot h \cdot \left[9,81 \cdot \frac{\gamma \cdot h}{2} + ctg\rho + 9,81 \cdot \left(\frac{tg\rho}{K_\psi} \cdot \gamma_p \cdot \cos^2 \rho \cdot \frac{H^2}{h} + \gamma_p \cdot H \right) \right], \text{кН};$$

$$P_{np} = 9,81 \cdot \gamma_p \cdot \cos^2 \rho \cdot \frac{B \cdot H^2}{2}, \text{кН};$$

$$P_{zop} = 2 \cdot tg\delta \cdot A_2 \cdot l_b \cdot h \cdot \left(9,81 \cdot \frac{\gamma \cdot h}{2} + ctg\rho \cdot C \right), \text{кН},$$

де α_p – кут різання, град.; δ – кут зовнішнього тертя, град.; B – ширина різання для неповоротного відвала, рівна довжині відвала B , м; h – глибина різання, м; γ – об'ємна маса ґрунту з незруйнованою структурою, т/м³; C – зчеплення ґрунту з незруйнованою структурою, кН/м²; ρ – кут внутрішнього тертя ґрунту, що розроблюється, град.; γ_p – об'ємна маса ґрунту з незруйнованою структурою, т/м³; H_{np} – висота призми волочіння, рівна висоті відвальної поверхні, м; l_b – ширина бокового ножа, м; A_1, A_2, K_ψ – коефіцієнти,

що визначаються за формулами:

$$A_1 = \frac{1 - \sin \rho \cdot \cos 2\alpha_p}{1 - \sin \rho};$$

$$A_2 = \frac{\cos \delta \cdot \left(\cos \delta + \sqrt{\sin^2 \rho - \sin^2 \delta} \right)}{1 - \sin \rho} \times e^{\left(\pi - 2\alpha_{\kappa\epsilon} + \delta + \arcsin \frac{\sin \delta}{\sin \rho} \right) tg \rho};$$

$$K_\psi = \frac{tg \alpha_p + tg \psi}{tg \alpha_p \cdot tg \psi}; \quad 0 < \alpha_{zam} < \frac{\pi}{2}$$

де e – основа натуральних логарифмів, $e = 2,718$; $\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}$ – кут зсуву ґрунту, град; α_{zam} – кут затуплення різального ножа.

Напрямок руху пласта на кінцевому етапі не завжди буде проходити по поверхні відвала. Він визначається величиною опорів, які виникають на шляху можливого просування, а також міцнісними властивостями стружки, що вирізається. Вважаючи поверхню ковзання криволінійною поверхнею з досить великим радіусом кривизни, розрахункову формулу для визначення P_T можна записати в такому спрощеному вигляді:

$$P_T = (1 + ctg\alpha_p \cdot tg\delta) \cdot A_1 \cdot B \cdot h \cdot \left[9,81 \cdot \frac{\gamma \cdot h}{2} + ctg\rho \cdot C + 9,81 \cdot \left(\frac{tg\rho}{K_\psi} \cdot \gamma_p \cdot \cos^2 \rho \cdot \frac{H^2}{h} + \gamma_p \cdot H \right) \right] + 9,81 \cdot \gamma_p \cdot \cos^2 \rho \cdot \frac{B \cdot H^2}{2}, \text{кН}. \quad (1)$$

Формула (1) отримана на основі статички сипкого середовища та дозволяє виконувати оцінювання відносної ефективності робочих органів відвального типу при $\rho > \delta$ та швидкості різання $v_m \leq 1,5$ м/с [3].

Розрахунок за формулою (1) передбачає необхідність знання фізико-механічних властивостей ґрунту, що розроблюється по параметрам ρ , δ , γ , γ_p , C . Ця теорія показує хороший збіг із практичними результатами для процесів копання зв'язних та незв'язних ґрунтів відносно невеликої міцності відвальними робочими органами бульдозерів та автогрейдерів, а також використовується для розрахунку зусиль копання ґрунту ковшовими робочими

органами скреперів, навантажувачів тощо. Розрахунок P_T за формулою (1) дає відносну помилку 4...25 % [3].

У практиці розрахунків використовують емпіричні залежності проф. А. Н. Зеленина для визначення опору копанню ґрунту

відвалом бульдозера [7]. На рисунку 5 показана розрахункова схема процесу взаємодії неповоротного відвалу бульдозера з ґрунтом в кінці набору призми волочіння за сталого режиму копання.

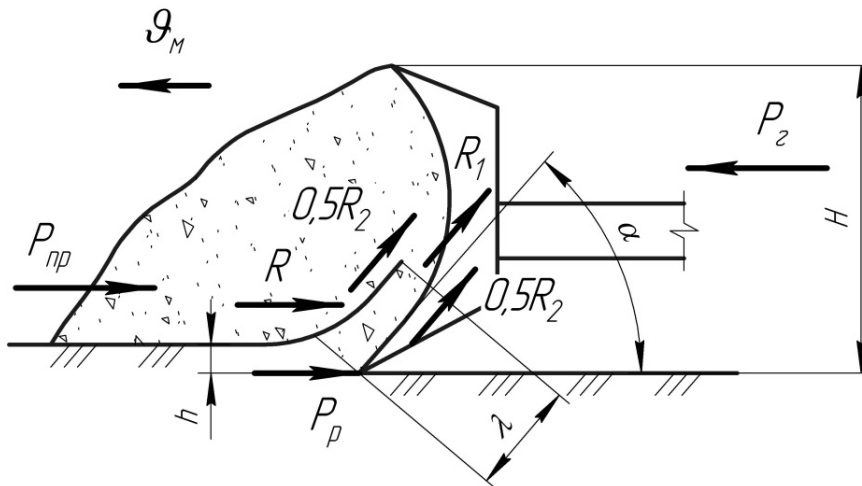


Рис. 5. Розрахункова схема взаємодії відвала бульдозера з ґрунтом у кінці копання за А. Н. Зелениним / Fig. 5. Calculation chart cooperation the dump bulldozer with soil at the end digging for A.N. Zeleninu

У відповідності з розрахунковою схемою (рис. 5) горизонтальна складова опору копанню ґрунту бульдозерним відвалом визначається із виразу [7]:

$$P_T = P_p + R + P_{np}, \quad (2)$$

де P_p – опір ґрунту різанню; R – опір заповнення відвала ґрунтом у кінці набору призми волочіння; P_{np} – опір переміщенню призми волочіння ґрунту перед відвалом.

$$P_p = 9,81 \cdot C \cdot h^{1,35} (1 + 2,6 \cdot l) \cdot (1 + 0,01 \cdot \alpha), \quad \text{кН}, \quad (3)$$

де C – кількість ударів ударника ДорНДІ; h – глибина різання, см; l – довжина відвала, м; α – кут різання, град.

$$R = (R_1 + R_2) \cdot \cos \delta_c, \quad \text{кН},$$

де R_1 – опір втисненню стружки в кінці набору призми волочіння перед відвалом; R_2 – опір тертя стружки ґрунту об ґрунт призми волочіння та по бульдозерному відвалу; δ_c – кут нахилу стружки до горизонту, град; $\delta_c = \alpha + 5 \dots 10^0$, α – кут різання, град.

$$R_1 = \xi \cdot K_{сжс} \cdot l_1 \cdot h, \quad \text{кН},$$

де ξ – коефіцієнт привантаження, що залежить від висоти бульдозерного відвала

H ; $\xi = 1$ при $H \leq 0,4$ м; $\xi = 1,5$ при $H = 0,4 \dots 1,0$ м; $\xi = 2$ при $H \geq 1$ м; $K_{сжс}$ – питомий опір вдавлювання стружки в кН/см², вибирається по таблиці 1 [7]; l_1 – довжина відвала, см; h – глибина різання, см.

$$R_2 = 2 \cdot H \cdot l \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot \text{tg} \frac{(\rho + \delta)}{2},$$

де H – висота відвала, м; l – довжина відвала, м; λ – довжина стружки, $\lambda = 0,25 \dots 0,35$ м; ρ – кут тертя ґрунту об ґрунт, град.; δ – кут тертя ґрунту об метал, град.

У зв'язку з незначною похибкою пропонується проводити розрахунок величини R за спрощеною формулою:

$$R = \xi \cdot K_{сжс} \cdot l_1 \cdot h. \quad (4)$$

Опір рухові призми волочіння ґрунту можна прорахувати за формулою:

$$P_{np} = 9,81 \cdot V_{np} \cdot \gamma \cdot \text{tg} \rho, \quad (5)$$

де V_{np} – фактичний об'єм призми волочіння в щільному тілі, м³; γ – об'ємна маса ґрунту в щільному тілі, т/м³.

Таблиця 1

Значення питомого опору вдавлювання стружки ґрунту $K_{сж}$ залежно від кількості ударів ударника ДорНДІ / Value specific resistance pressing shaving of soil $K_{сж}$ is depending on the amount shots shock-worker DorNDI

C	1-2	3	4	6
$K_{сжс}$, кН/см ²	0,000686	0,001568	0,002156	0,00245
C	10	16	30	–
$K_{сжс}$, кН/см ²	0,004704	0,007056	0,01372	–

$$V_{np} = \frac{l \cdot H^2}{2 \cdot K_{np}}, \quad (5a)$$

де l – довжина відвала, м; H – висота відвала, м; K_{np} – коефіцієнт, що залежить від типу ґрунту (в'язкості, коефіцієнта розпушення) та від співвідношення $\frac{H}{l}$. Значення коефіцієнта K_{np} від співвідношення $\frac{H}{l}$ та типу ґрунту (табл. 1.2, [7]).

З урахуванням виразів (3), (4) та (5) формула (2) матиме вигляд:

$$P_T = 9,81 \cdot C \cdot h^{1,35} \cdot (1 + 2,6 \cdot l) \cdot (1 + 0,01 \cdot \alpha) + \xi \cdot K_{сжс} \cdot l_1 \cdot h + 9,81 \cdot V_{np} \cdot \gamma \cdot tg\rho. \quad (6)$$

До недоліків емпіричної формули (6) можна віднести складність точного розрахунку об'єму призми волочіння V_{np} , який становить величину, що визначається експериментально. Крім того, формула справджується для однорідних ґрунтів і не може бути використана для ґрунтів із каменистими включеннями, оскільки величина C визначається ударником ДорНДІ та може виявитися неточною. Формула (6) справедлива за швидкостей різання ґрунту $g_m \leq 1,5$ м/с, а також для умов, за яких були отримані коефіцієнти ξ , $K_{сжс}$ та сама формула.

У практиці розрахунків горизонтальної складової опору копанню відвалом бульдозера в кінці набору призми волочіння використовується розрахункова формула к. т. н. А. А. Яркіна [12]:

$$P_T = P_p + P_{np} + P_e = K \cdot l \cdot h + 9,81 \cdot V_{np} \cdot \gamma \cdot tg\rho + 9,81 \cdot V_{np} \cdot \gamma \cdot \cos^2 \alpha \cdot tg\delta, \text{ кН}, \quad (7)$$

де P_p – опір різанню; P_{np} – опір призми волочіння; P_e – опір переміщення ґрунту вверх по відвалу; K – питомий опір ґрунту лобовому різанню, кН/м²; середнє значення K при куті різання $\alpha = 45^0 \dots 60^0$ складають у кН/м² [12]:

- для ґрунтів I категорії – 70;
- для ґрунтів II категорії – 110;
- для ґрунтів III категорії – 170;

l – ширина відвала бульдозера, м; h – глибина різання, м; V_{np} – фактичний об'єм призми волочіння в щільному тілі, визначається за формулою (5a); γ – об'ємна маса ґрунту в щільному тілі, кг/м³; $tg\rho$ – коефіцієнт опору переміщенню призми волочіння ґрунту по ґрунту [12]:

- для зв'язних ґрунтів $tg\rho = 0,5$;
- для незв'язних ґрунтів $tg\rho = 0,7$;
- (максимальне значення $tg\rho = 1$);

$tg\delta$ – коефіцієнт тертя ґрунту об метал:

- для зв'язних ґрунтів $tg\delta = 0,5$;
- для незв'язних ґрунтів $tg\delta = 0,7$.

Формула (7) використовується для орієнтовних розрахунків, оскільки числові дослідні коефіцієнти K , $tg\rho$, $tg\delta$ мають наближені значення, справедливі значення тільки для конкретних ґрунтових умов.

Один із способів розрахунку сил різання ґрунтів (рис. 6) розробив та запропонував проф. Ю. О. Ветров [11]. Він відрізняється можливістю окремо враховувати вплив на сили різання основних факторів процесу різання та засновується на закономірностях

цього процесу для простих ножів, що відділяють стружку, із яких звичайно утворюється різальна частина робочих органів землерийних машин. Сила різання простим гострим ножом залежить від трьох основних геометричних параметрів: ширини зрізу, товщини зрізу (глибини різання) та кута різання. Взаємодія ножа із ґрунтом має просторовий характер.

Силу блокового різання P розкладають на три складові:

$$P = P_{св} + P_{бок} + P_{бок.ср}, \quad (8)$$

де $P_{св}$ – сила, потрібна для подолання опору ґрунту передньою гранню ножа (пропорційна площі перерізу прорізи перед передньою гранню ножа та залежить від кута різання та міцності ґрунту); $P_{бок}$ – сила, потрібна для подолання опору ґрунту руйнуванню в бокових розширеннях прорізи (пропорційна їх площі перетину, залежить від міцності ґрунту та не залежить від кута різання та ширини зрізу); $P_{бок.ср}$ – сила, необхідна для подолання опору ґрунту зрізу боковими ребрами ножа біля дна прорізи (пропорційна товщині зрізу,

залежить від міцності ґрунту та не залежить від кута різання та ширини зрізу).

Якщо ніж має площадку зношення чи затуплення, виникає додаткова сила різання

$P_{пл.зн}$:

$$P_{св} = p_{св} \cdot F_{св}; \quad P_{бок} = p_{бок} \cdot F_{бок};$$

$$P_{бок.ср} = p_{бок.ср} \cdot L_{бок};$$

$$P_{пл.зн} = p_{пл.зн} \cdot L_{пл.зн},$$

де $p_{св}$, $p_{бок}$ – питомі сили руйнування ґрунту відповідно в середній частині та бокових розширеннях прорізи; $F_{св}$, $F_{бок}$ – площі середніх та бокових частин поперечного перерізу прорізи; $p_{бок.ср}$ – питома сила зрізу ґрунту боковими ребрами ножа; $L_{бок}$ – сумарна довжина лінії зрізу ґрунту боковими ребрами ножа; $p_{пл.зн}$ – питома сила для подолання опору ґрунту на площадці зношення чи затуплення ножа, що припадає на одиницю довжини різального краю; $L_{пл.зн}$ – довжина затупленого чи зношеного різального краю (у разі блокового різання простим ножом вона рівна ширині зрізу).

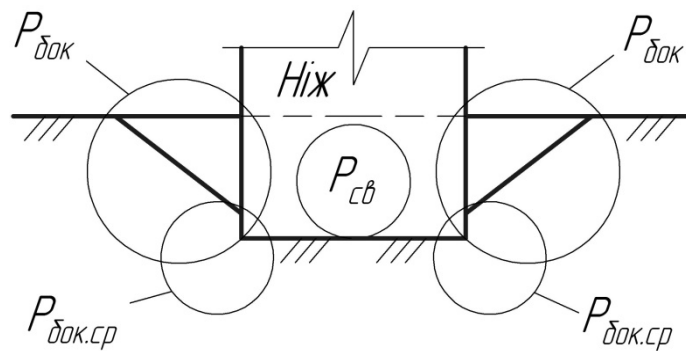


Рис. 6. Зони дії складових сили різання гострим ножом /
Fig. 6. Zones action constituents cutting force by a sharp knife

Формула (8) може бути використана для зубів ковшів та розпушувачів. Недоцільно її застосовувати для визначення опору копанню ґрунту відвалом бульдозера, оскільки ця формула не містить членів, що характеризують сили опору заповнення відвала ґрунтом та переміщення призми волочіння перед відвалом.

Визначаються оптимальна висота, ширина відвала бульдозера та довжина

транспортування, за яких буде повністю використане тягове зусилля базової машини, отримана максимально можлива продуктивність, дотримані умови пересування бульдозера з неповоротним відвалом по зчепленню та мінімальною глибиною різання в кінці копання ґрунту, необхідною для відновлення призми волочіння за неминучих втрат ґрунту в бокові валки, забезпечений мінімум

узагальненого показника енергоємності та металоємності.

Для складання алгоритму оптимізації висоти та ширини відвала використовуються формули тягового розрахунку бульдозера, визначення продуктивності, енергоємності, металоємності, глибини різання на початку та в кінці копання ґрунту й інших параметрів.

Загальний опір, що діє на бульдозер під час транспортування об'єму ґрунту, що міститься перед відвалом, визначається за формулою:

$$W_T = W_{np} + W_{cmp} + W_{nep}, \quad (9)$$

де W_{np} – опір переміщенню призми волочіння ґрунту перед відвалом, кН; W_{cmp} – опір переміщенню ґрунту вверх по відвалу, кН; W_{nep} – опір переміщенню бульдозера,

кН.

$$W_{np} = 9,81 \cdot V_{np} \cdot \gamma \cdot tg \rho,$$

де V_{np} – об'єм призми волочіння ґрунту, м³; γ – об'ємна маса ґрунту, т/м³; ρ – кут тертя ґрунту об ґрунт.

$$V_{np} = \frac{B \cdot H^2}{2 \cdot K_{np}},$$

де H – висота відвалу, м; B – ширина відвалу, м; K_{np} – коефіцієнт, що залежить від типу ґрунту (зв'язності, коефіцієнта розпушення) та співвідношення $\frac{H}{B}$. Значення коефіцієнта K_{np} залежно від співвідношення $\frac{H}{B}$ та типу ґрунту наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнта призми волочіння ґрунту K_{np} / Value coefficient prism dragging of soil K_{np}

Співвідношення H/B	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
Зв'язні ґрунти I–III категорії	0,7	0,73	0,77	0,8	0,85	0,9	0,95
Незв'язні ґрунти	1,15	1,17	1,19	1,2	1,2	1,3	1,5

$$W_{cmp} = 9,81 \cdot V_{np} \cdot \gamma \cdot \cos^2 \alpha \cdot tg \delta,$$

де α – кут різання, град.; γ – об'ємна маса ґрунту, т/м³; δ – кут тертя ґрунту об метал, град.

$$W_{nep} = 9,81 \cdot G \cdot (f \pm i),$$

де G – маса трактора та бульдозерного обладнання, т; f – коефіцієнт опору переміщенню руху трактора, $f = 0,1 \dots 0,12$; i – нахил місцевості.

Знак «плюс» ставиться під час роботи бульдозера на підйомах та знак «мінус» – на схилах. Якщо кут нахилу місцевості $\beta \geq 10^0$ (0,175 рад), розрахунок слід проводити за більш точною формулою:

$$W_{nep} = 9,81 \cdot G \cdot (f \cdot \cos \beta \pm i \cdot \sin \beta),$$

при $\beta = 0$ маємо $W_{nep} = 9,81 \cdot G \cdot f$;

$$G = G_m + G_b, \quad (9a)$$

де G_m – маса трактора, т; G_b – маса бульдозерного обладнання, що орієнтовно може бути визначена за формулою:

$$G_{b,j+1} = \frac{H_{j+1}}{H_{min}^{noch}} \cdot G_{b,min}^{noch} \cdot K_{G,j+1},$$

де $G_{b,j+1}$ – маса бульдозерного обладнання за збільшеної висоти відвала бульдозера, т; H_{j+1} – збільшена висота відвала бульдозера порівняно з початковою прийнятою висотою відвала бульдозера, м; H_{min}^{noch} – початково прийнята висота відвала бульдозера, м; $K_{G,j+1}$ – коефіцієнт збільшення маси бульдозерного обладнання, що залежить від збільшення висоти та ширини відвала, співвідношення H/B .

Орієнтовне значення коефіцієнта $K_{G,j+1}$ залежно від співвідношення H/B наведені в таблиці 3.

За $H_{j+1} = H_{min}^{noch}$ та $K_{G,j+1}$ маємо $G_{b,j+1} = G_{b,min}^{noch}$.

Таблиця 3

**Орієнтовні значення коефіцієнта збільшення маси бульдозерного обладнання /
Reference values coefficient increase mass of bulldozer equipment**

Співвідношення H/B	0,15	0,20	0,25	0,3	0,35	0,40	0,45
Коефіцієнт K_G	1,00	1,02	1,04	1,05	1,05	1,13	1,31

Визначаємо тягове зусилля базової машини T за формулою:

$$T = 0,9P_{кол} = \frac{0,9 \cdot N_{дв}}{g_p}, \quad (10)$$

де $P_{кол}$ – колове зусилля на ведучих колесах тягача або ведучих зірочках гусеничного трактора, кН; $N_{дв}$ – потужність двигуна базової машини, кВт; g_p – швидкість руху бульдозера під час копання ґрунту, $g_p = 0,4...0,5$ м/с.

Визначаємо необхідне тягове зусилля для різання ґрунту на кінцевому етапі копання:

$$T_{риз} = T - W_T = T - (W_{np} + W_{cmp} + W_{nep}).$$

Товщина стружки на кінцевому етапі копання h_2 визначається за формулою:

$$h_2 = \frac{T_{риз}}{L \cdot K}, \quad (11)$$

де K – питомий опір ґрунту лобовому різанню, кН/м², для ґрунту I категорії $K = 70...100$ кН/м²; II категорії $K = 100...180$ кН/м²; III категорії $K = 180...200$ кН/м²; L – довжина шляху транспортування ґрунту, м.

Для того, щоб призма ґрунту, що переміщується, поповнювала свій об'єм у разі втрат у бокові валки, необхідно, щоб дотримувалась умова $h_2 \geq h_{заг}$, де $h_{заг}$ – величина заглиблення ножа бульдозера на кінцевому етапі копання, за якої відновлюються втрати ґрунту в транспортованій призмі волочіння під час її переходу в бокові валки.

Величину заглиблення ножа бульдозера можна визначити за формулою:

$$h_{заг} = \frac{K_{вал} \cdot V_{np}}{L}, \quad (12)$$

де $K_{вал}$ – коефіцієнт, що характеризує втрати ґрунту в бокові валки на 1 м шляху,

$K_{вал} = \frac{V_{вал}}{V_{np}}$; $V_{вал}$ – об'єм ґрунту в бокових

валках у щільному тілі на 1 м шляху, м³/м.

Орієнтовно коефіцієнт $K_{вал}$ можна прийняти рівним для ґрунтів:

зв'язних $K_{вал} = 0,025...0,032$;

незв'язних $K_{вал} = 0,06...0,07$.

Визначаємо опір ґрунту різанню на кінцевому етапі копання:

$$W_p = K \cdot h_{заг} \cdot L.$$

Загальний опір, що діє на бульдозер під час його руху на кінцевому етапі копання:

$$\sum W = W_p + W_{np} + W_{cmp} + W_{nep}. \quad (13)$$

Тяговий розрахунок передбачає безумовне виконання умови

$$\sum W \leq G_{зч} \cdot \varphi \leq T,$$

де T – тягове зусилля базової машини, кН; $G_{зч}$ – зчїпна вага бульдозера, рівна для бульдозерів на пневмоколісному ході вазі, що припадає на ведучі колеса, а для бульдозерів на гусеничному ході, рівна загальній вазі бульдозера, $G_{зч} = G$; φ – коефіцієнт зчеплення, який може бути прийнятий рівним 0,9 для гусеничних машин та 0,6 – для колісних машин [12].

Продуктивність бульдозера під час різання та переміщення ґрунту визначається за формулою:

$$П = \frac{3600 \cdot V_{np} \cdot K_g \cdot K_y \cdot K_n}{T_{ч} \cdot K_p}, \quad (14)$$

де K_g – коефіцієнт використання бульдозера за часом, $K_g = 0,8...0,85$; K_y – коефіцієнт, що враховує вплив нахилу місцевості на продуктивність бульдозера (табл. 4).

K_p – коефіцієнт розпушення ґрунту, $K_p = 1,05...1,35$; $K_n = 1 - 0,005 \cdot l_{mp}$ – коефіцієнт, що враховує втрати під час переміщення ґрунту; l_{mp} – довжина переміщення (транспортування) ґрунту, м; $T_{ч}$ – тривалість робочого циклу.

$$T_y = \frac{l_p}{g_p} + \frac{l_{mp}}{g_{mp}} + \frac{l_p + l_{mp}}{g_{xx}} + t_{nom},$$

де l_p – довжина шляху різання, м;
 g_p – швидкість руху бульдозера під час різання ґрунту, $g_p = 0,4 \dots 0,5$ м/с; g_{mp} – швидкість руху бульдозера під час переміщення ґрунту, $g_{mp} = 0,9 \dots 1,0$ м/с; g_{xx} – швидкість зворотного (холостого) ходу трактора, $g_{xx} = 1,1 \dots 1,2$ м/с; t_{nom} – загальний час, що затрачується на опускання відвала, на переключення передач та на розворот, $t_{nom} = 25 \dots 26$ с.

$$l_p = \frac{V_{np}}{F} = \frac{V_{np}}{L \cdot h_{cp}} = \frac{2 \cdot V_{np}}{L \cdot (h_1 - h_2)},$$

де F – площа ґрунту, що зрізається, м²;
 h_{cp} – середня глибина різання, м;

h_1 – глибина різання на початку копання, м;
 h_2 – глибина різання на кінцевому етапі копання, м.

$$h_1 = \frac{T - W_{nep}}{K \cdot L};$$

$$g_{mp} = \frac{N_{\text{дв}}}{P_{\text{кол}}} = \frac{0,9 \cdot N_{\text{дв}}}{W_{np} + W_{стр} + W_{nep}},$$

де $N_{\text{дв}}$ – потужність двигуна базової машини, кВт; $P_{\text{кол}}$ – колове зусилля на ведучих колесах тягача або на ведучих зірочках гусеничного трактора, що витрачається на переміщення (транспортування) ґрунту та бульдозера, $P_{\text{кол}} = 1,1 \cdot T$; T – тягова сила, що використовується на переміщення (транспортування) ґрунту та бульдозера, кН.

Таблиця 4

Значення коефіцієнта впливу нахилу місцевості на продуктивність бульдозера / Value coefficient of influence inclination locality on the productivity bulldozer

Кут підйому, град.	K_y	Кут схилу, град.	K_y
0...5	1,00...0,67	0...5	1,00...1,33
5...10	0,67...0,50	5...10	1,33...1,94
10...15	0,5...0,40	10...15	1,94...2,25
		15...20	2,25...2,68

Узагальнений критерій оцінки технічного рівня варіанта конструкції машини на передпроектних етапах проектування Π_{NG} може бути визначений за формулою:

$$\Pi_{NG} = \frac{N_{\text{дв}} \cdot G}{\Pi^2}, \quad (15)$$

де $N_{\text{дв}}$ – встановлена потужність базової машини, кВт; G – загальна маса бульдозера, т; Π – продуктивність, м³/год.

Висновок. На основі тягового балансу розроблено алгоритм оптимізації геометричних параметрів відвала бульдозера телескопічного типу за узагальненим критерієм оптимізації Π_{NG} залежно від потужності двигуна базової машини та фізико-механічних властивостей середовища, що розроблюється.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дорожные машины. Машины для земляных работ : монография / [Т. В. Алексеева, К. А. Артемьев, А. А. Бромберг и др.] – Москва : Машиностроение, 1972. – 504 с.
2. Баловнев В. И. Дорожно-строительные машины с рабочими органами интенсифицирующего действия : монография / [В. И. Баловнев]. – Москва: Машиностроение, 1981. – 224 с.
3. Баловнев В. И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин : монография / [В. И. Баловнев]. – Москва : Высшая школа, 1982. – 335 с.
4. Дорожные машины. Теория, конструкция и расчет : учеб. для вузов / [Н. Я. Хархута, М. И. Капустин, В. П. Семенов, И. М. Эвентов]. – Ленинград : Машиностроение, 1976. – 472 с.
5. Строительные машины : монография / [Н. Г. Домбровский, Ю. Л. Картвелишвили, М. И. Гальперин]. – Москва : Машиностроение, 1976. – 391 с.

6. Зеленин А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами : монография / [А. Н. Зеленин]. – Москва : Машиностроение, 1968. – 376 с.
7. Машины для земляных работ : учеб. пос. для вузов / [А. Н. Зеленин, В. И. Баловнев, И. П. Керов]. – Москва : Машиностроение, 1975. – 424 с.
8. Машины для земляних робіт : підручник / [Л. А. Хмара, С. В. Кравець, М. П. Скоблюк та ін.; за заг. ред. д. т. н., проф. Л. А. Хмари та д. т. н., проф. С. В. Кравця]. – Харків : ХНАДУ, 2014. – 548 с.
9. Машины для земляних робіт: навч. посіб. / [Л. А. Хмара, С. В. Кравець, В. В. Нічке, Л. В. Назаров, М. П. Скоблюк, В. Г. Нікітін; під заг. ред. проф. Л. А. Хмари та проф. С. В. Кравця]. Рівне – Дніпропетровськ – Харків, 2010. – 557 с.
10. Машины для земляных работ : монография / [Ю. А. Ветров, А. А. Кархов, А. С. Кондра и др.]. – Киев : Высшая школа, 1976. – 368 с.
11. Навесное тракторное оборудование для разработки высокопрочных грунтов : монография / [Б. З. Захарчук, Г. А. Шлойдо, А. А. Яркин и др.]. – Москва : Машиностроение, 1979. – 191 с.
12. Проектирование машин для земляных работ. Под ред. А. М. Холодова. – Харьков : Высшая школа, 1986. – 272 с.
13. Землеройно-транспортные машины : монография / [А. М. Холодов, В. В. Ничке, Л. В. Назаров]. – Харьков : Высшая школа, 1982. – 192 с.
14. Шаммат Н. К. Основы BASIC и объектно-проектированного программирования : монография / [Н. К. Шаммат]. – Киев : Диалектика, 1996. – 448 с.
15. Шилдт Г. Н. Языки программирования : монография / [Г. Н. Шилдт]. – Санкт-Петербург, 1996. – 416 с.

REFERENCES

1. Alekseeva T.V., Artemev K.A., Bromberg A.A. and oth. *Dorozhnyie mashinyi. Mashinyi dlya zemlyanyih rabot* [Traveling machines. Machines for earthmovings]. Moscow : Engineering, 1972, 504 p. (in Russian).
2. Balovnev V.I. *Dorozhno-stroitelnyie mashinyi s rabochimi organami intensifitsiruyushego deystviya* [Trail builders with the working organs of intensifying action]. Moscow : Engineering, 1981, 224 p. (in Russian).
3. Balovnev V.I. *Modelirovanie protsessov vzaimodeystviya so sredoy rabochih organov dorozhno-stroitelnyih mashin* [Design of processes co-operating with the environment of working organs trail builders]. Moscow : High School, 1982, 335 p. (in Russian).
4. Harhuta N.Ya., Kapustin M.I., Semenov V.P. and Eventov I.M. *Dorozhnyie mashinyi. Teoriya, konstruktsiya i raschet. Uchebnyk dlya vuzov* [Theory, construction and calculation. Textbook for institutions of higher learning]. Leningrad : Engineering, 1976, 472 p. (in Russian).
5. Dombrovskiy N.G., Kartvelishvili Yu.L. and Galperin M.I. *Stroitelnyie mashinyi* [Building machines]. Moscow : Engineering, 1976, 391 p. (in Russian).
6. Zelenin A.N. *Osnovy razrusheniya gruntov mehanicheskimi sposobami* [Bases of destruction soils mechanical methods]. Moscow : Engineering, 1968, 376 p. (in Russian).
7. Zelenin A.N., Balovnev V.I. and Kerov I.P. *Mashinyi dlya zemlyanyih rabot. Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Machines for earthmovings. Train aid for institutions higher learning]. Moscow : Engineering, 1975, 424 p. (in Russian).
8. Khmara L.A., Kravets S.V., Skoblyuk M.P. and oth. *Mashini dlya zemlyanah robit : pidruchnik* [Machines for earthmovings : textbook]. Edited by Dr. Sc. (Tech.), Prof. L.A. Khmara and Dr. Sc. (Tech.), Prof. S. V. Kravets. Kharkiv : KhNASU, 2014, 548 p. (in Ukrainian).
9. Khmara L.A., Kravets S.V., Niche V.V., Nazarov L.V., Skoblyuk M.P. and Nikitin V.G.; edited by Dr. Sc. (Tech.), Prof. L.A. Khmara and Dr. Sc. (Tech.), Prof. S. V. Kravets. *Mashini dlya zemlyanah robit : navchalniy posibnik* [Machines for earthmovings : textbook]. Rivne – Dnipropetrovsk – Kharkiv, 2010, 557 p. (in Ukrainian).
10. Vetrov Yu.A., Karhov A.A., Kondra A.S. and oth. *Mashinyi dlya zemlyanyih rabot* [Machines for earthmovings]. Kyiv : High School, 1976, 368 p. (in Russian).
11. Zaharchuk B.Z., Shloydo G.A., Yarkin A.A. and oth. *Navesnoe traktornoe oborudovanie dlya razrabotki vyisokoprochnyih gruntov* [Cover tractor equipment for development of durable soils]. Moscow : Engineering, 1979, 191 p. (in Russian).
12. *Proektirovanie mashin dlya zemlyanyih rabot* [Planning of machines for earthmovings]. Edited by A.M. Kholodov. Kharkiv : High School, 1986, 272 p. (in Russian).
13. Kholodov A.M., Niche V.V. and Nazarov L.V. *Zemleroyno-transportnyie mashinyi* [Earthmovers-transport machines]. Kharkiv : High School, 1982, 192 p. (in Russian).
14. Shammatt N.K. *Osnovy BASIC i ob'ektno-proektirovannogo programmirovaniya* [Bases of BASIC and objective-designed programming]. Kyiv : Dialektika, 1996, 448 p. (in Russian).
15. Shildt G.N. *Yazyiki programmirovaniya* [Programming languages]. Saint-Petersburg, 1996, 416 p. (in Russian).

Надійшла до редакції 13.07.2019 р.