

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-330-342>

EDN: LCUINW

Научная статья



## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ГРУНТОМ НОЖА И НИЖНЕЙ ЧАСТИ ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА В НАЧАЛЕ ПРОХОДА

**В. А. Николаев***Ярославский государственный технический университет,  
г. Ярославль, Россия**Nikolaev53@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-7503-6612>*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В начале производства дорожно-строительных работ необходимо удалить камни, кусты, деревья с полосы отвода будущей дороги. Для выполнения таких работ целесообразно использовать агрегаты циклического действия, в частности с бульдозерным оборудованием. Взаимодействие с грунтом ножа и отвала бульдозера сопровождается комплексом взаимосвязанных процессов. Эти процессы осложняют теоретический анализ взаимодействия ножа и нижней части отвала бульдозерного оборудования с грунтом. Поэтому, несмотря на большое количество публикаций, взаимодействие ножа и нижней части отвала бульдозерного оборудования с грунтом проанализировано недостаточно подробно. Между тем без подробного анализа этого взаимодействия сложно осуществить модернизацию бульдозерного оборудования.

**Методика исследования.** Взаимодействие с грунтом ножа и отвала бульдозера имеет две особенности. Во-первых, нож бульдозера с прямым отвалом установлен перпендикулярно направлению движения агрегата, поэтому нож бульдозера осуществляет энергозатратное резание грунта. Во-вторых, отрезанный пласт грунта отвал бульдозера перемещает перед собой. Вогнутая форма поверхности рабочего органа обуславливает вогнутую эпюру напряжений смятия, приводящую к появлению зоны объёмного сжатия грунта, которая во время передвижения агрегата всё более увеличивается. Увеличивается как девиаторная, так и шаровая составляющая тензора напряжений в грунте. Поэтому передняя поверхность ножа разделена на лезвие и плоскость, осуществляющую совместно с плоскостью нижней части отвала смещение первично сдвинутого грунта. Необходимо рассматривать отдельно воздействие на грунт лезвия, края ножа, передней поверхности ножа и нижней части отвала.

**Результаты.** Из чертежей определены: длина следа поверхности псевдосдвига грунта в продольно-вертикальном сечении, площадь первичного сдвига грунта краем ножа, площадь воздействия на грунт поверхности ножа, площадь воздействия на грунт поверхности нижней части отвала. Вычислена площадь псевдосдвига грунта и площадь смещения первично сдвинутого грунта. Построены зависимости площадей от заглупления ножа бульдозера.

**Заключение.** По мере увеличения глубины хода ножа бульдозера площадь псевдосдвига грунта поверхностью ножа, площадь первичного сдвига грунта правой или левой кромкой ножа увеличиваются линейно. При этом площадь смещения первично сдвинутого грунта увеличивается по параболе. Выявление площади псевдосдвига грунта, площади первичного сдвига грунта правой или левой кромкой ножа и площади смещения первично сдвинутого грунта позволит определить затраты энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала на грунт.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** грунт, бульдозерное оборудование, нож, нижняя часть отвала, резание, анализ, площадь поверхности.

**Статья поступила в редакцию 10.03.2022; одобрена после рецензирования 19.05.2022; принята к публикации 10.06.2022.**

**Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.**

**Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.**

*Для цитирования:* Николаев В. А. Взаимодействие с грунтом ножа и нижней части отвала бульдозера в начале прохода // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 3 (85). С. 330-342. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-330-342>

© Николаев В. А., 2022



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-330-342>  
EDN: LCUINW  
Original article

## KNIFE AND BULLDOZER BOTTOM BLADE INTERACTION WITH SOIL AT THE BEGINNING OF A PASS

**Vladimir A. Nikolayev**

Yaroslavl Technical University,  
Yaroslavl, Russia

[Nikolaev53@inbox.ru](mailto:Nikolaev53@inbox.ru), <https://orcid.org/0000-7503-6612>

### ABSTRACT

**Introduction.** At the beginning of the production of road construction works, it is necessary to remove stones, bushes, trees from the right-of-way of the future road. To perform such work, it is advisable to use cyclic units, in particular, with bulldozer equipment. Interaction with the soil of the knife and the blade of the bulldozer is accompanied by a complex of interrelated processes. These processes complicate the theoretical analysis of the interaction of the knife and the bottom part of the blade of bulldozer equipment with the soil. Therefore, despite the large number of publications, the interaction of the knife and the bottom part of the blade of bulldozer equipment with the soil is not analyzed in sufficient details. Meanwhile, without a detailed analysis of this interaction, it is difficult to modernize bulldozer equipment.

**The method of research.** Interaction with the soil of the knife and the blade of the bulldozer has two features. First, the knife of a bulldozer with a straight blade is installed perpendicular to the direction of movement of the unit, so the bulldozer knife carries out energy-intensive cutting of the soil. Secondly, the cut layer of soil moves the pile of the bulldozer in front of it. The concave shape of the surface of the working body causes a concave mapping of crumple stresses, leading to the appearance of a zone of volumetric compression of the soil, which increases more and more during the movement of the unit. Both the deviator and ball components of the stress tensor in the ground increase. Therefore, the front surface of the knife is divided into a blade and a plane that carries out, together with the plane of the lower part of the blade, the displacement of the primary displaced soil. It is necessary to consider separately the impact on the ground of the blade, the edge of the knife and the front surface of the knife and the lower part of the blade.

**Results.** From the drawings the length of the trace of the surface of the pseudo-displacement of the soil in the longitudinal-vertical section, the area of the primary ground shift with the edge of the knife, the area of impact on the ground of the knife surface, the area of impact on the ground of the surface of the lower part of the blade are determined. The area of pseudo-displacement of the soil and the area of displacement of the primary shifted soil were calculated. The dependencies of the areas on the recess of the bulldozer knife are constructed.

**Conclusion.** As the depth of the bulldozer knife increases, the area of pseudo-displacement of the soil by the surface of the knife, the area of primary ground shear with the right or left edge of the knife increases linearly. In this case, the displacement area of the primary shifted soil increases by the parabola. Identifying the area of the pseudo-displacement of the soil, the area of the primary ground shift with the right or left edge of the knife and the displacement area of the primary shifted soil will determine the energy costs required to affect the surface of the knife and the lower part of the blade on the ground.

**KEYWORDS:** soil, bulldozer equipment, knife, bottom blade, cutting, analysis, surface area.

**The article was submitted 10.03.2022; approved after reviewing 19.05.2022; accepted for publication 10.06.2022.**

**The authors have read and approved the final manuscript.**

**Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.**

*For citation:* Nikolayev V. A. Knife and bulldozer bottom blade interaction with soil at the beginning of a pass. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (3): 330-342. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-330-342>

© Nikolayev V. A., 2022



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1) выявлены комплексы взаимосвязанных процессов, происходящих в грунте при поступлении отрезанного пласта на рабочую поверхность ножа и отвала;

2) разработана методика определения площади поверхности псевдосдвига грунта, площади первичного сдвига грунта краем ножа и площади смещения грунта ножом и нижней частью отвала;

3) приведён пример измерений и расчётов этих площадей, исходя из начальных условий;

4) построены зависимости площадей от заглубления ножа бульдозера.

### ВВЕДЕНИЕ

В начале производства дорожно-строительных работ необходимо удалить камни, кусты, деревья с полосы отвода будущей дороги. Для выполнения таких работ целесообразно использовать агрегаты циклического действия, в частности с бульдозерным оборудованием. Хотя теоретические основы разработки грунта весьма подробно рассмотрены<sup>1, 2, 3</sup>[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22], но, основываясь на них, сложно выявить и сопоставить частные затраты энергии воздействия на грунт элементов технических средств, в частности бульдозерного оборудования.

Взаимодействие с грунтом ножа и отвала бульдозера сопровождается комплексом взаимосвязанных процессов. При поступлении отрезанного пласта на рабочую поверхность ножа и отвала в грунте происходит:

- взаимное смещение структурных микро- и макроотдельностей;
- разрушение структурных отдельностей вследствие трения грунта о рабочую поверхность отвала и грунта о грунт;
- выдавливание воды и воздуха из пор;
- сжатие защемлённого воздуха в замкнутых и тупиковых порах;
- деформация плёнок адсорбированной воды в точках взаимного соприкосновения частиц;
- упругие и пластические деформации структурных отдельностей;

– пластические деформации органических частиц, имеющихся в грунте.

Указанные процессы осложняют теоретический анализ взаимодействия ножа и нижней части отвала бульдозерного оборудования с грунтом. Поэтому, несмотря на большое количество публикаций, взаимодействие ножа и нижней части отвала бульдозерного оборудования с грунтом проанализировано недостаточно подробно. Между тем без подробного анализа этого взаимодействия сложно осуществить модернизацию бульдозерного оборудования.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При вспашке почвы [26] основная работа рыхления приходится на лемех и переднюю часть отвала. Разрушение происходит вдоль двух поверхностей раздела, первая из которых проходит вертикально и наклонена к стенке борозды под углом  $\psi_r$ , вторая начинается от дна борозды и наклонена к нему под углом  $\psi_b$ , измеренным в плоскости, ортогональной лезвию лемеха. Аналогично при взаимодействии с грунтом бульдозера основная работа рыхления приходится на нож и нижнюю часть отвала. Однако сдвиг пласта ножом бульдозера возможен только под углом  $\psi_b$ , измеренным в продольно-вертикальной плоскости.

В отличие от вспашки почвы взаимодействие с грунтом ножа и отвала бульдозера имеет две особенности. Во-первых, лемех плуга установлен под острым углом к направлению движения агрегата, а нож бульдозера с прямым отвалом – перпендикулярно направлению движения агрегата, поэтому лемех плуга осуществляет резание со скольжением, а нож бульдозера более энергозатратное резание грунта. Во-вторых, отрезанный пласт почвы отвал плуга оборачивает в сторону, а отвал бульдозера осуществляет более энергозатратное перемещение грунта перед собой. Поэтому при обороте пласта почвы происходит только трение грунта об отвал, а при разработке грунта бульдозером происходит как трение грунта об отвал, так и трение разрыхлённого грунта о неразрыхлённый грунт.

<sup>1</sup> Зыков Б. И. Теория рабочих процессов строительных машин. Ярославль: Изд. ЯГТУ, 2003. 114 с.

<sup>2</sup> Жук А. Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ротационного плуга. Сборник научных трудов «Теория и расчёт почвообрабатывающих машин». Т. 120. М.: Машиностроение, 1989. С. 145–153.

<sup>3</sup> Попов Г. Ф. Рабочие органы фрез. М.: Материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. ОНТИ ВИСХОМ, 1970. С. 490–497.

После заглупления нож и нижняя часть отвала бульдозера начинают упругое сжатие отделённого пласта, которое усиливается по мере продвижения агрегата. Это увеличение связано не только с воздействием силы тяжести отделённого пласта грунта на отрезаемый грунт, но и с формой рабочей поверхности отвала бульдозера. Вогнутая форма поверхности рабочего органа обуславливает вогнутую эпюру напряжений смятия (рисунок 1, а), приводящую к появлению зоны сжатия грунта, которая во время передвижения агрегата всё более увеличивается.

Девиаторная составляющая тензора напряжений сжатия, направленная по осевой линии дуги  $LM$ , также увеличивается. Появляется шаровая составляющая тензора напряжений, которая имеет тенденцию к увеличению с увеличением вогнутости рабочей поверхности. При этом грунт перед рабочей поверхностью отвала разрушается на фрагменты самым энергозатратным способом объёмного сжатия.

Точка  $D$  на рисунке 1, б соответствует положению частицы грунта на рабочей поверхности отвала, когда зона сжатия достигнет точки  $A$ , если имеется край неразработанного грунта или поперечная борозда. В этот момент нормаль к рабочей поверхности отвала в крайней верхней точке контакта расположена горизонтально. По мере дальнейшего перемещения пласта грунта по рабочей поверхности отвала граница зоны сжатия смещается вниз. При этом продолжается упругое сжатие грунта в пласте, достигая предела прочности на сдвиг. Однако при воздействии на грунт ножа и нижней части отвала бульдозера, за редким исключением, отсутствует край неразработанного грунта или поперечная борозда. Поэтому граница зоны сжатия полностью расположена в неразрыхлённом грунте. Грунт перед ножом бульдозера испытывает самую энергозатратную деформацию объёмного сжатия. Отсюда затраты энергии на один кубический метр грунта, разрабатываемого бульдозером, очень велики. Фактором, уменьшающим затраты энергии на разработку грунта бульдозером, является малая скорость агрегата, которая существенно меньше скорости фронта ударной волны в грунте. Фронт ударной волны, перемещаясь в грунте впереди отвала, способствует разрушению сплошности грунта.

Когда напряжение объёмного сжатия грунта достигнет критического значения, может произойти первичный сдвиг пласта под углом  $\psi_b$ , измеренным в продольно-вертикальной плоскости. Следует обратить внимание на две существенных особенности сдвига грунта

ножом и нижней частью отвала бульдозера. Первая особенность заключена в сложности определения площади поверхности сдвига в продольно-вертикальной плоскости. След поверхности сдвига не является идеальной прямой, поэтому лишь в первом приближении, вычисляя площадь поверхности сдвига, необходимо след поверхности сдвига в продольно-вертикальной плоскости умножить на ширину плоскости сдвига. Во втором приближении, вычисляя площадь поверхности сдвига, следует учитывать краевые эффекты, то есть распространение поверхности сдвига в массив грунта по краям ножа, если резание грунта зажатое в поперечно-вертикальной плоскости, или распространение поверхности сдвига в массив грунта с одного края ножа, если резание грунта полузажатое в поперечно-вертикальной плоскости. В третьем приближении поверхность сдвига грунта ножом и нижней частью отвала бульдозера является не плоскостью, а сложной поликриволинейной поверхностью, площадь которой меняется по величине и форме во времени. Для упрощения расчёта будем считать поверхность сдвига грунта плоской, а её отклонения от плоскости учтём корректировкой напряжения сдвига.

Вторая особенность заключена в том, что явный сдвиг грунта бульдозером маловероятен в связи с большой площадью поверхности сдвига. Сдвиг грунта будет состоять из периодических микросдвигов [23]. Микросдвиги обусловлены превышением предела прочности грунта в отдельных участках рассматриваемого сечения. После микросдвига грунта напряжение в каком-либо участке уменьшится на некоторую величину, затем вновь возрастёт до предела прочности на сдвиг за счёт давления ножа и нижней части отвала, передаваемого через слой грунта. Путь агрегата, на котором происходит микросдвиг грунта, обусловлен физико-механическими свойствами грунта, формой рабочей поверхности ножа и нижней части отвала, скоростью агрегата. Установлено, что средний путь агрегата, на котором происходит микросдвиг грунта, 18 мм [23]. Так как сдвиг пласта состоит из периодических микросдвигов, при вычислении силы, необходимой для сдвига грунта, следует сделать поправку на коэффициент микросдвигов  $k_{мсд} \approx 0,5$  [23]. Его физический смысл заключён в учёте доли влияния затрат энергии на создание в грунте деформации объёмного сжатия на общие затраты энергии в момент сдвига грунта.

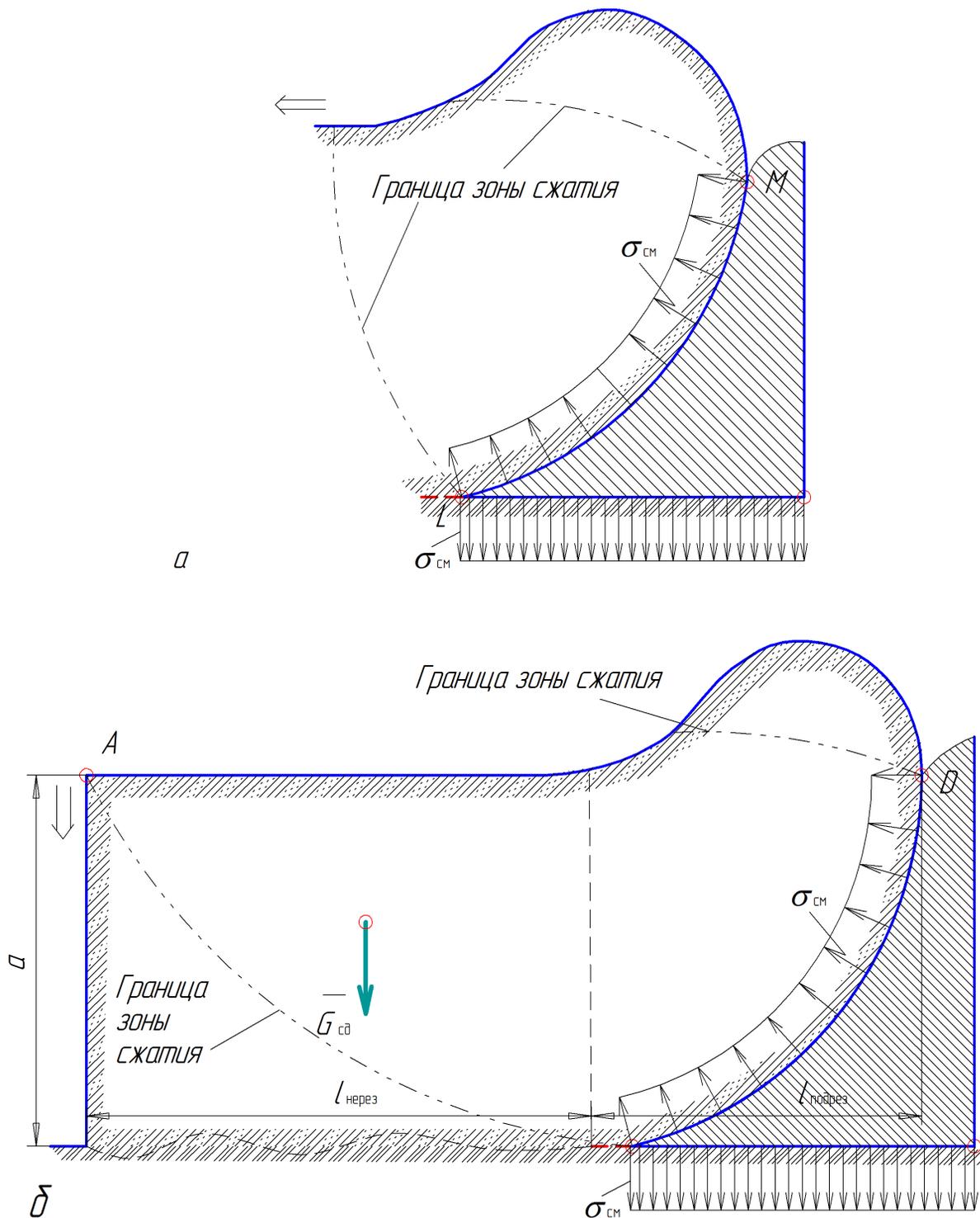


Рисунок 1 – Вертикальное сечение пласта в продольно-вертикальной плоскости:  
 а – при внедрении ножа бульдозера в грунт; б – распространение границы объёмного сжатия до края неразработанного грунта или поперечной борозды  
 Источник: составлено автором.

Figure 1 – Vertical cross-section of the layer in the longitudinal-vertical plane:  
 а) when the bulldozer knife is inserted into the ground;  
 б) extension of the volumetric compression boundary to the edge of undeveloped soil or transverse furrow  
 Source: compiled by the author.

Разберём на конкретном примере полузажатое резание грунта острым ножом (рисунок 2). Проведём перпендикуляр к передней поверхности ножа через точку  $A$ , из кромки лезвия ножа. От него отложим угол трения грунта о сталь  $\varphi_{c-r}$ . След  $AH$  первичного сдвига грунта в продольно-вертикальном сечении наклонен к горизонтали под углом  $\psi_B=14^\circ$  и имеет длину  $l_{cd}$ . Так как реальный сдвиг грунта по этой поверхности маловероятен, назовём её плоскость псевдосдвига. Площадь наклонной плоскости псевдосдвига, след которой в продольно-вертикальном сечении  $AH$ ,

$$S_{cd} = Bl_{cd} \quad (1)$$

Сдвиг также осуществляют края ножа и нижней части отвала. Если рассматривать в поперечно-вертикальной плоскости, при полузажатом резании или правая или левая кромка ножа осуществляет сдвиг в условной плоскости  $ABCH$ . Площадь поверхности сдвига грунта правой или левой кромкой ножа  $S_{ABCH}$ .

Плоскость ножа смещает грунт после его первичного сдвига. Площадь смещения грунта  $S_{cm} = S_{BCDE}$  (см. рисунок 2). Если заглубление более  $h_H$ , с грунтом взаимодействует не только плоскость ножа, но и нижняя часть отвала бульдозера. При этом площадь воздействия на грунт поверхности ножа  $S_{BCDE}$ , поверхности нижней части отвала  $S_{DEMN}$ . Общая площадь смещаемого грунта

$$S_{cm} = S_{BCDE} + S_{DEMN} \quad (2)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

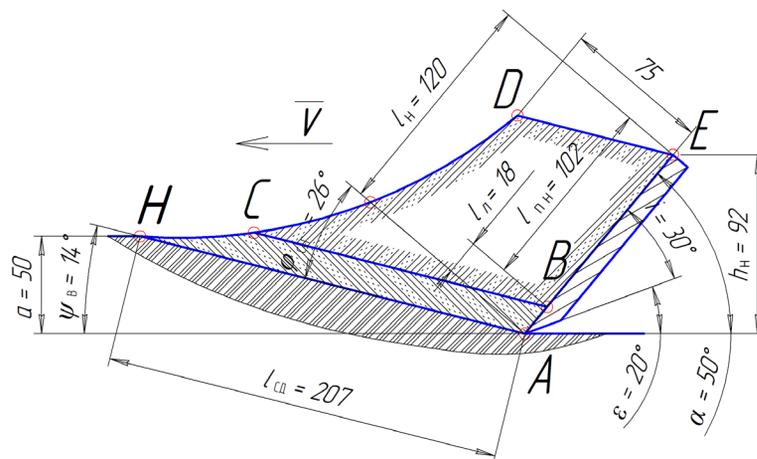
Определим длину следа в продольно-вертикальном сечении и площадь поверхности псевдосдвига грунта, площадь первичного сдвига грунта краем ножа и площадь смещения грунта ножом и нижней частью отвала, если заглубление ножа изменяется от 50 до 300 мм, радиус закругления отвала  $R=1000$  мм, ширина ножа  $B=2500$  мм, длина ножа  $l_H=120$  мм.

Для обеспечения заглубления оборудования бульдозера, чтобы задняя поверхность не взаимодействовала с грунтом при заглублении, задний угол ножа должен быть  $\varepsilon \geq 20^\circ$ . Так как угол заострения ножа  $i = \alpha - \varepsilon \geq 30^\circ$ , передний угол  $\alpha \geq 50^\circ$ . Примем  $\alpha = 50^\circ$ ,  $\varepsilon = 20^\circ$ , (см. рисунок 2). Угол заострения и передний угол больше угла трения грунта о сталь:  $\varphi_{c-r} \approx 26^\circ$ .

Допустим, глубина хода ножа  $a=50$  мм. Из рисунка 2, а высота подъёма грунта ножом  $h_H=92$  мм. Так как средний путь агрегата, на котором происходит микросдвиг грунта, 18 мм, разделим переднюю поверхность ножа на лезвие длиной  $l_H=18$  мм и плоскость,  $l_{HH}=102$  мм. Допустим, коэффициент, учитывающий увеличение объёма грунта при его разрыхлении,  $k_p=1.5$ . Тогда на сходе с ножа толщина слоя грунта  $1.5a$ .

Из рисунка 2 определим:

- длину  $l_{cd}$  следа  $AH$  поверхности псевдосдвига грунта в продольно-вертикальном сечении;
- площадь плоскости  $ABCH$  первичного сдвига грунта краем ножа;
- площадь  $BCDE$  воздействия на грунт поверхности ножа;
- площадь  $DEMN$  воздействия на грунт поверхности нижней части отвала.



а



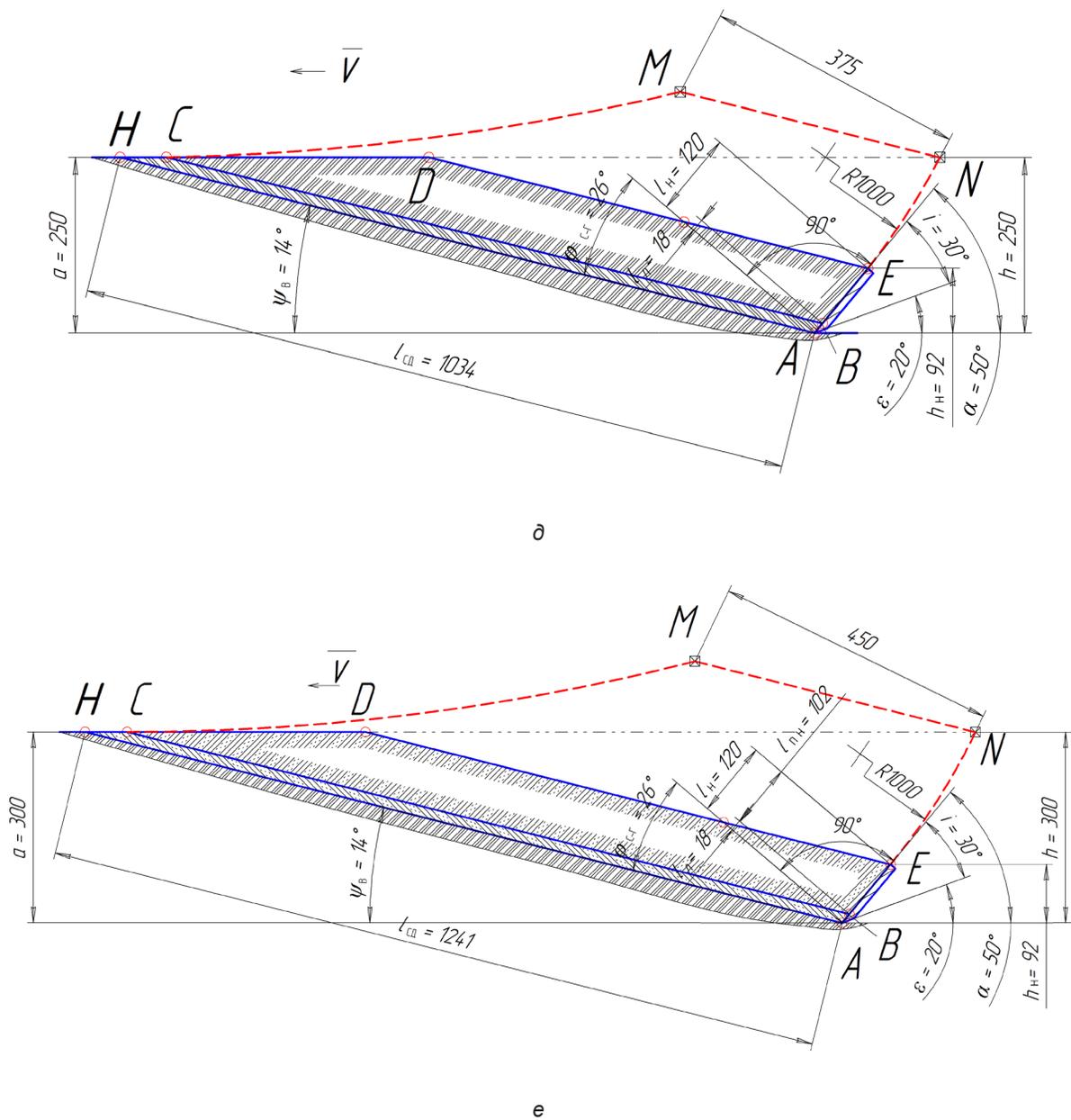


Рисунок 2 – Определение площадей сдвига грунта лезвием и поверхностью ножа в начале прохода бульдозера при заглублении ножа: а – 50 мм; б – 100 мм; в – 150 мм; г – 200 мм; д – 250 мм; е – 300 мм  
 Источник: составлено автором.

Figure 2 – Determination of the areas of ground shear with the blade and the surface of the knife at the beginning of the bulldozer pass when the knife is buried: 50 mm; b) 100 mm; c) 150 mm; d) 200 mm; e) 250 mm; (e) 300 mm  
 Source: compiled by the author.

Таблица  
Площади сдвига грунта лезвием ножа бульдозера после заглабления  
и площади смещения сдвинутого грунта поверхностью ножа и нижней части отвала  
Источник: составлено автором.

Table  
Shift areas of the bulldozer blade after burial and displacement areas  
of the displaced soil by the blade surface and the bottom blade  
Source: compiled by the author.

Заглабление ножа, а	Длина следа первичного сдвига грунта	Ширина захвата, В	Площадь сдвига грунта по наклонной поверхности	Площадь сдвига грунта в продольно-вертикальной плоскости	Площадь сечения смещаемого грунта ножом	Площадь сечения грунта, смещаемого нижней частью отвала	Общая площадь сечения смещаемого грунта
мм	мм	мм	кв. мм	кв. мм	кв. мм	кв. мм	кв. мм
50	207	2500	517500	2882	10004	0	10004
100	414	2500	1035000	6293	23656	2238	25894
150	620	2500	1550000	9590	37376	23420	60796
200	827	2500	2067500	12924	55806	55517	111323
250	1034	2500	2585000	16271	74770	101210	175980
300	1241	2500	3102500	19618	93734	160143	253877

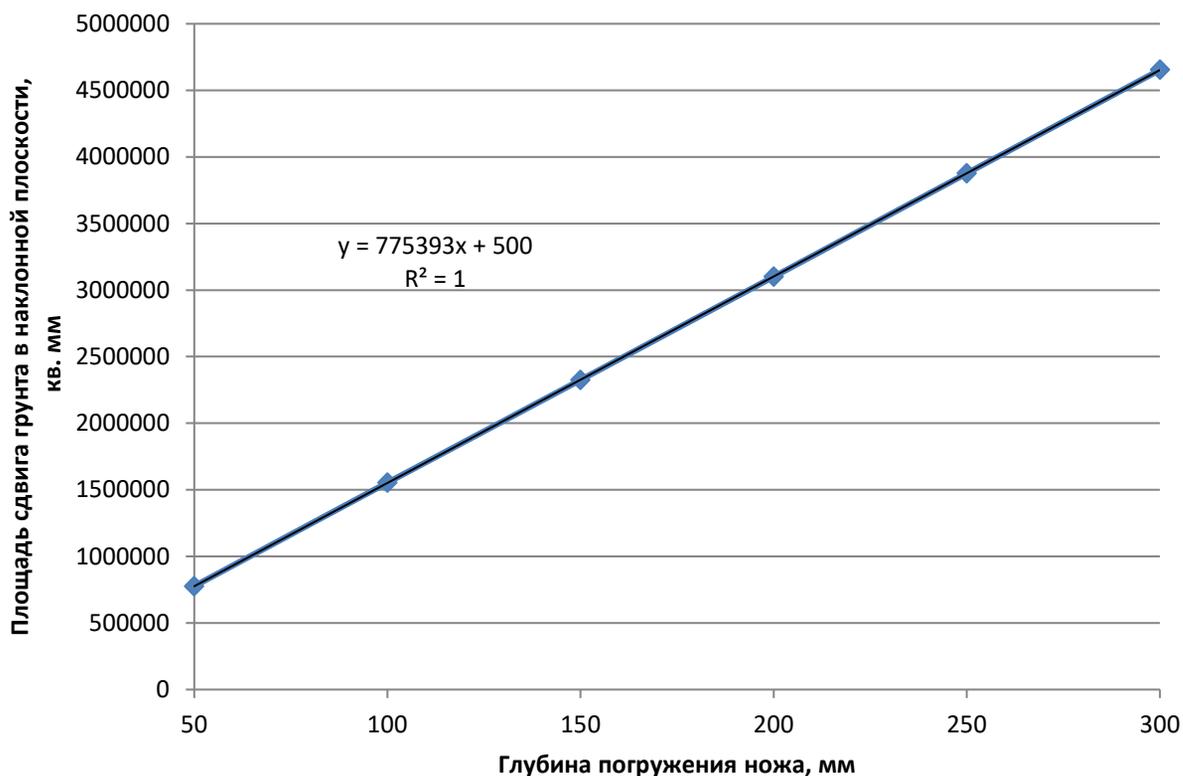


Рисунок 3 – Зависимость площади поверхности псевдосдвига грунта от заглабления ножа бульдозера  
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Dependence of the surface area of the soil pseudo-slide on the recess of the bulldozer knife  
Source: compiled by the author.

По формулам (1), (2) вычислим площадь псевдосдвига, след которой в продольно-вертикальном сечении АН, и общую площадь смещаемого грунта. Результаты измерений и вычислений в таблице.

На основе результатов измерений и вычислений построим зависимости от заглубления ножа бульдозера: площади поверхности псев-

досдвига грунта; площади АВСН первичного сдвига грунта краем ножа; площади ВСDE воздействия на грунт поверхности ножа, площади DEMN воздействия на грунт поверхности нижней части отвала и общей площади смещаемого грунта. Аппроксимация зависимостей на графиках (рисунки 3, 4, 5).

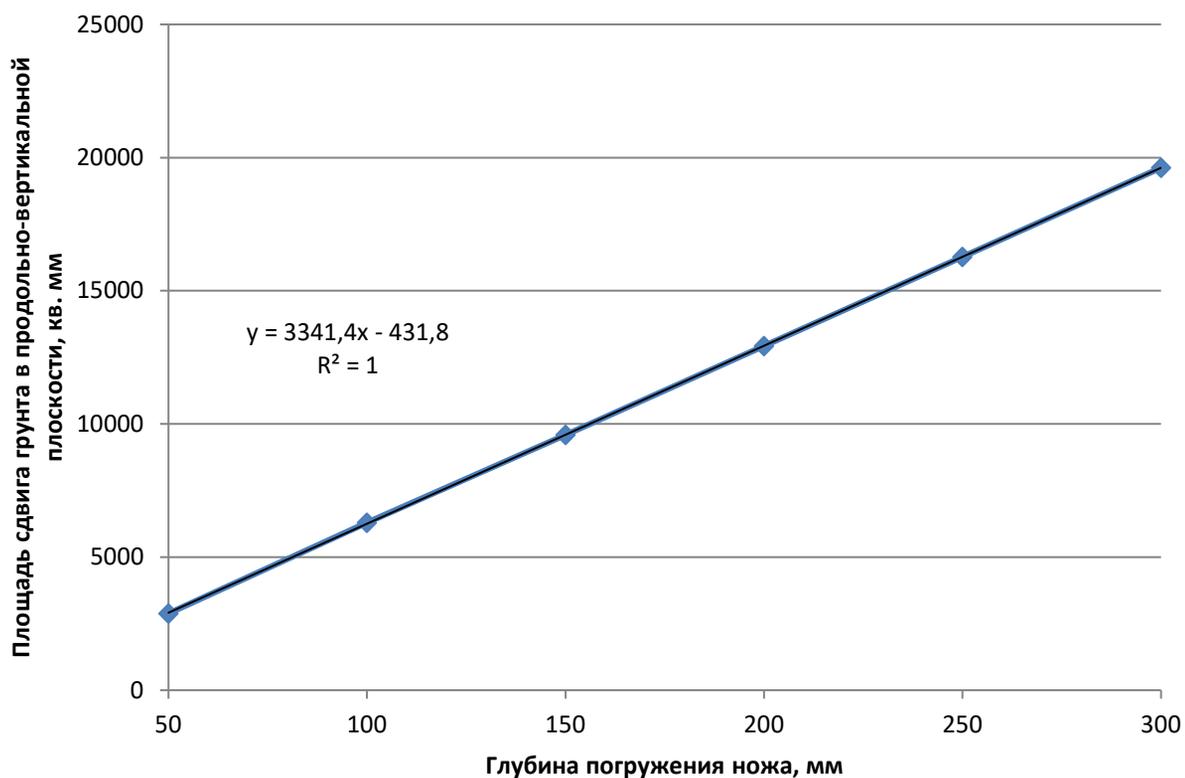


Рисунок 4 – Зависимость площади поверхности АВСН первичного сдвига грунта правой или левой кромкой ножа от заглубления ножа бульдозера  
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Dependence of the surface area for ABCН of the primary ground shift by the right or left edge of the knife on the deepening of the bulldozer knife  
Source: compiled by the author.

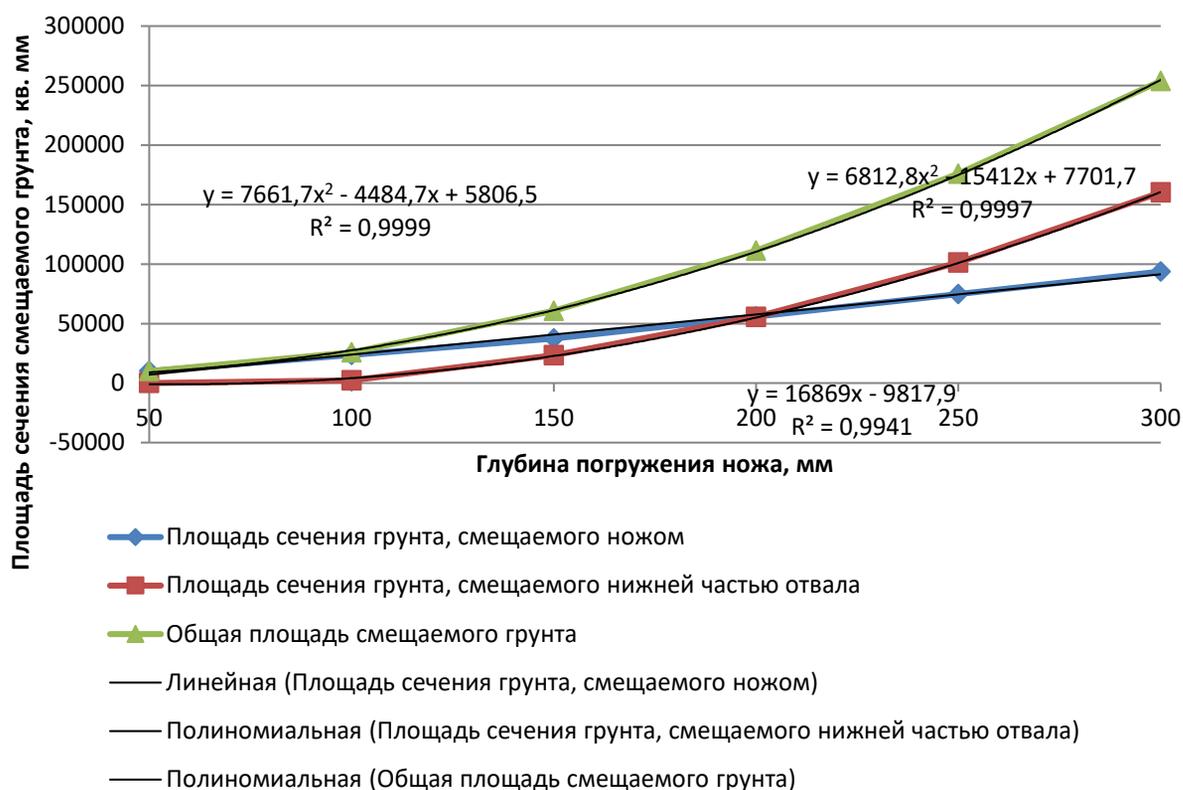


Рисунок 5 – Зависимость площади BCDE воздействия на грунт поверхности ножа, площади DEMN воздействия на грунт поверхности нижней части отвала и общей площади смещения первично сдвинутого грунта от заглубления ножа бульдозера  
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Dependence of the area for BCDE impact on the ground of the knife surface, the area of DEMN impact on the ground of the surface of the bottom blade and total area of displacement of the primary shifted soil from the depth of the bulldozer knife  
Source: compiled by the author

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По мере увеличения глубины хода ножа бульдозера, площадь псевдосдвига грунта, площадь первичного сдвига грунта правой или левой кромкой ножа увеличиваются линейно. При этом площадь смещения первично сдвинутого грунта увеличивается по параболе:

$$S_{\text{см}} = 7661,7a^2 - 4484,7a + 5806,5.$$

Выявление площади псевдосдвига грунта, площади первичного сдвига грунта правой или левой кромкой ножа и площади смещения первично сдвинутого грунта позволит определить затраты энергии, необходимой для воз-

действия поверхности ножа и нижней части отвала на грунт, и модернизировать бульдозерное оборудование<sup>4</sup>.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карасёв Г. Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. № 4. С. 36–42.
2. Карнаухов А. И., Орловский С. Н. Определение затрат удельной энергии на процесс резания лесных почв торцевыми фрезами // Строительные и дорожные машины. 2010. № 1. С. 20–22.
3. Кравец И. М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // Строительные и дорожные машины. 2010. № 5. С. 47–49.

<sup>4</sup> Николаев В. А. Оборудование бульдозера. Патент РФ №2770854. Заявка №2021130731; зарегистрирована 20.10.2021; опубл. 22.04.2022; бюл. № 8.

4. Кириллов Ф. Ф. Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многорезцовых рабочих органов землеройных машин // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 44–48.

5. Берестов Е. И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 34–38.

6. Вершинин А. В., Зубов В. С., Тюльнев А. М. Повышение эффективности дискофрезерных рабочих механизмов для разработки мёрзлых грунтов // Строительные и дорожные машины. 2012. № 8. С. 42–44.

7. Баловнев В. И., Нгуен З. Ш. Определение сопротивлений при разработке грунтов рыхлителем по интегральному показателю прочности // Строительные и дорожные машины. 2005. № 3. С. 38–40.

8. Ryabets N., Kurzhner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. P. 115-128.

9. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil // Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 65. P. 421-428.

10. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling // Cold Regions Science and Technology. 2013. Vol. 86. P. 142-166.

11. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scopic damage development of frozen soil under triaxial shearing // Rock and Soil Mechanics. 2005. № 8. P. 150-163.

12. Li Q. Development of Frozen Soil Model // Advances in Earth Science. 2006. №12. P. 96-103.

13. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007. 448 p.

14. Баловнев В. И., Данилов Р. Г., Улитич О. Ю. Исследование управляемых ножевых систем землеройно-транспортных машин // Строительные и дорожные машины. 2017. №2. С. 12-15.

15. Нилов В. А., Фёдоров Е. В. Разработка грунта скрепером в условиях свободного резания // Строительные и дорожные машины. 2016. № 2. С. 7–10.

16. Чмиль В. П. Насосно-аккумулятивный привод рыхлителя с автоматическим выбором угла резания // Строительные и дорожные машины. 2016. № 11. С. 18–20.

17. Кабашев Р. А., Тургумбаев С. Д. Экспериментальные исследования процесса копания грунтов роторно-дисковыми рабочими органами под гидростатическим давлением // Вестник СибАДИ. 2016. № 4. С. 23–28.

18. Сёмкин Д. С. О влиянии скорости рабочего органа на силу сопротивления резанию грунта // Вестник СибАДИ. 2017. № 1. С. 37–43.

19. Константинов Ю. В. Методика расчёта сопротивления и момента сопротивления резанию почвы прямым пластинчатым ножом фрезы // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 5. С. 31–39.

20. Сыромятников Ю.Н., Храмов И.С., Войнаш С.А. Гибкий элемент в составе рабочих органов роторной почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 5. С. 32–39.

21. Пархоменко Г. Г., Пархоменко С. Г. Силовой анализ механизмов перемещения рабочих органов почвообрабатывающих машин по заданной траектории // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 1. С. 47–54.

22. Драняев С. Б., Чаткин М. Н., Корявин С. М. Моделирование работы винтового Г-образного ножа почвообрабатывающей фрезы // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 7. С. 13–19.

23. Николаев В. А. Машины для обработки почвы. Теория и расчёт / В. А. Николаев. Ярославль: Изд-во ФГБОУ ВПО ЯГСХА, 2014. 358 с.

## REFERENCES

1. Karasjov G. N. Opredelenie sily rezanija grunta s uchjotom uprugih deformacij pri razrushenii [Definition of the cutting force of soil considering elastic deformation at fracture]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2008; 4: 36-42. (in Russ.)

2. Karnauhov A. I., Orlovskij S. N. Opredelenie zatrat udel'noj jenergii na process rezanija lesnyh pochv torcevmi frezami [Costing of specific energy on the cutting process of forest soils end mills]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 1:20-22. (in Russ.)

3. Kravec I. M. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezanija pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezoj [Determine critical cutting depth when combined cutting soils gidrofrezoj]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 5: 47-49. (in Russ.)

4. Kirillov F. F. Determinirovannaja matematicheskaja model' vremennogo raspredelenija tjagovogo usilija dlja mnogorezcovykh rabochih organov zemlerojnyh mashin [Deterministic mathematical model of the temporal distribution of traction for mnogorezcovykh working bodies of earthmoving machines] *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 44-48. (in Russ.)

5. Berestov E. I. Vlijanie trenija grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniju [Influence of friction of soil on the surface of the knife cutting resistance]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 34-38. (in Russ.)

6. Vershinin A. V., Zubov V. S., Tjul'nev A. M. Povyshenie jeffektivnosti diskofrezernyh rabochih mehanizmov dlja razrabotki mjrzlyh gruntov [Improving the efficiency of the working mechanisms for the development of diskofrezernyh mjrzlyh soil]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2012; 8: 42-44. (in Russ.)

7. Balovnev V. I., Nguen Z. Sh. Opredelenie soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelju prochnosti [Identification of resistances when designing primers Ripper by a combined indicator of strength]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2005; 3: 38-40. (in Russ.)

8. Ryabets N., Kurzhner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. *Cold Regions Science and Technology*. 2003; 36: 115-128.

9. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil. *Cold Regions Science and Technology*. 2011; 65: 421-428.

10. Talalay P. G. Subglacial till and Bedrock drilling. *Cold Regions Science and Technology*. 2013; 86: 142-166.
11. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scopical damage development of frozen soil under triaxial shearing. *Rock and Soil Mechanics*. 2005; 8: 150-163.
12. Li Q. Development of Frozen Soil Model. *Advances in Earth Science*. 2006; 12: 96-103.
13. Atkinson J. *The Mechanics of Soils and Foundations*. CRC. Press. 2007: 448.
14. Balovnev V. I., Danilov R. G., Ulitich O. Ju. Issledovanie upravljajemyh nozhevych sistem zemlerojno-transportnyh mashin [Study of guided knife systems of ground-moving vehicles]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2017; 2: 12-15. (in Russ.)
15. Nilov V. A., Fjodorov E. V. Razrabotka grunta skreperom v uslovijah svobodnogo rezanija [Ground development with a scraper in free cutting conditions]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 2: 7-10. (in Russ.)
16. Chmil' V. P. Nasosno-akkumuljativnyj privod ryhlitelja s avtomaticheskim vyborom ugla rezanija. [Pump-accumulating ripper drive with automatic cutting angle selection]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 11: 18-20. (in Russ.)
17. Kabashev R. A., Turgumbaev S. J. Experimental research of the process of digging soil rotary-disk working bodies under hydrostatic pressure. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016;(4(50)):23-28. (In Russ.)
18. Semkin D. S. About influence of speed working bodies of digging machines on the resistance force of soil cutting. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017;(1(53)):37-43. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1\(53\)-37-43](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-37-43)
19. Konstantinov Ju. V. Metodika raschjota soprotivlenija i momenta soprotivlenija rezaniju pochvy pri jamym plastinchatym nozhom frezy [The method of calculating resistance and the moment of resistance to soil cutting with a straight plate cutter knife]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2019; 5: 31-39. (In Russ.)
20. Syromjatnikov Ju. N., Hramov I. S., Vojnash S. A. Gibkij jelement v sostave rabochih organov rotornoj pochvoobrabatyvajushhej ryhlitel'no-separirujushhej mashiny [Flexible element in the working organs of the rotary soil processing loosening and separating machine]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 5: 32-39. (In Russ.)
21. Parhomenko G. G., Parhomenko S. G. Silovoj analiz mehanizmov peremeshhenija rabochih organov pochvoobrabatyvajushchih mashin po zadannoj traektorii [Power analysis of the mechanisms of movement of working bodies of soil processing machines on a given trajectory]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 1: 47-54. (In Russ.)
22. Dranjaev S. B., Chatkin M. N., Korjavin S. M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvajushhej frezy [Simulation of the work of a screw G-shaped knife soil cutter]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017; 7: 13-19. (In Russ.)
23. Nikolaev V. A. *Mashiny dlja obrabotki pochvy. Teorija i raschjot* [Soil processing machines. Theory and calculation]. 2014:358. (In Russ.)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины».

#### AUTHOR INFORMATION

Vladimir A. Nikolayev. Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machinery Department