

УДК 625.08

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-12-23>

АНАЛИЗ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ НА РЕЗАНИЕ ГРУНТА ДИСКАМИ

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

АННОТАЦИЯ

Введение. При проектировании агрегата для формирования подстилающего слоя возникла проблема выбора рабочих органов, предназначенных для предварительного рыхления поверхностного слоя грунта, насыщенного корнями растений, с целью последующего обнажения подстилающего слоя строящейся автомобильной дороги. При выборе рабочих органов технических средств следует учитывать многие факторы. Однако решающим показателем являются затраты энергии на единицу объема обрабатываемого материала. Хотя теоретические основы резания грунта весьма подробно рассмотрены, но, основываясь на них, сложно выявить и сопоставить затраты энергии на единицу объема разрабатываемого грунта. Варианты определения действующих сил и затрат энергии на резание грунта дисками, изложенные различными авторами, предполагают решение весьма громоздких зависимостей. Они основаны на синтезном подходе к решению проблемы. Не отвергая синтезный подход, сделан анализ взаимодействия дисков с грунтом. Вычисление затрат энергии дискового рыхлителя осуществлено на основе выявленных ранее значений его геометрических, кинематических и динамических параметров.

Методика исследования. На основе конструктивной компоновки дискового рыхлителя определено состояние и время перемещения дискового рыхлителя для разработки грунта объемом один кубический метр. Для анализа диск разделён на элементы: кромку лезвия, фаску лезвия и боковые поверхности диска. Разработана методика определения затрат энергии: на отделение пласта грунта от его массива, разделение пласта на фрагменты, преодоление напора грунта на фаску диска, ускорение грунта фаской лезвия диска, преодоление трения между грунтом и фаской лезвия диска, преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска. Разработана схема условных сил воздействия фаски лезвия диска на грунт для определения условной нормальной реакции фаски лезвия диска и схема сил для определения нормальной реакции боковой поверхности диска на воздействие грунта. Затраты энергии на резание корней кромкой лезвия диска можно определить только путём экспериментов.

Результаты. На основе разработанной методики определены затраты энергии: на отделение пласта грунта от его массива, разделение пласта на фрагменты, преодоление напора грунта на фаску диска, ускорение грунта фаской лезвия диска, преодоление трения между грунтом и фаской лезвия диска, преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска. Из схемы условных сил воздействия фаски лезвия диска на грунт определена условная нормальная реакция фаски лезвия диска. Из другой схемы сил выявлена нормальная реакция боковой поверхности диска на воздействие грунта. Суммарные объёмные затраты энергии на резание грунта дисками получены путём сложения выявленных частных затрат энергии.

Заключение. На основании проведённых теоретических исследований вычислены объёмные затраты энергии на резание грунта дисками. К ним необходимо добавить затраты энергии: на резание корней кромками лезвий дисков и на перемещение дискового рыхлителя. В структуре известных затрат энергии преобладает энергия на преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска. Так как затраты энергии на резание грунта дисками весьма велики, в агрегате для формирования подстилающего слоя их применение нецелесообразно. Это не исключает применение дисковых рыхлителей для других целей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, диск, дисковый рыхлитель, резание, анализ, силы, затраты энергии

Статья поступила в редакцию 21.11.2021; одобрена после рецензирования 24.12.2021; принята к публикации 28.02.2022.

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. Анализ затрат энергии на резание грунта дисками // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 1(83). С. 12-23. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-12-23>

© Николаев В.А., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-12-23>

Original article

ENERGY COSTS FOR CUTTING SOIL WITH DISKS ANALYSIS

Vladimir A. Nikolayev

Yaroslavl Technical University,

Yaroslavl, Russia

nikolaev53@inbox.ru

ABSTRACT

Introduction. When designing a unit for the formation of the underlying layer, the problem arose of choosing working bodies designed for preliminary loosening of the surface layer of soil saturated with plant roots, with the aim of subsequent exposure of the underlying layer of the road under construction. When choosing the working bodies of technical means, many factors should be taken into account. However, the decisive indicator is the energy consumption per unit volume of the material being processed. Although the theoretical foundations of cutting soil are considered in great detail, but based on them it is difficult to identify and compare energy costs per unit volume of the developed soil. Options for determining the active forces and energy costs for cutting soil with disks, outlined by various authors, suggest the solution of very cumbersome dependencies. They are based on a synthesis approach to solving the problem. Without rejecting the synthesis approach, an analysis of the interaction of disks with the soil is made. Calculation of energy costs of disk ripper is carried out on the basis of previously identified values of its geometric, kinematic and dynamic parameters.

The method of research. Based on the structural layout of the disc ripper, the distance and time of movement of the disc ripper for the development of soil with a volume of one cubic meter was determined. For analysis, the disc is divided into elements: the edge of the blade, the chamfer of the blade and the side surfaces of the disc. A method for determining energy costs has been developed: for separating the soil layer from its array, dividing the layer into fragments, overcoming the soil pressure on the chamfer of the disk, accelerating the soil with a chamfer of the disc blade, overcoming friction between the soil and the chamfer of the disc blade, overcoming friction between the soil and the side surface of the disk. A scheme of conditional forces of influence of a chamfer of a blade of a disk on a ground for determination of conditional normal reaction of a chamfer of a blade of a disk and scheme of forces from determination of normal reaction of a lateral surface of a disk on influence of a ground is developed. The energy costs of cutting the roots with the edge of the blade of the disc can only be determined by experiments.

Results. On the basis of the developed methodology, energy costs have been determined: for separating the soil layer from its array, dividing the layer into fragments, overcoming the ground pressure on the chamfer of the disk, accelerating the soil with the chamfer of the blade of the disk, overcoming friction between the soil and the chamfer of the blade of the disk, overcoming friction between the soil and the side surface of the disk. From the scheme of the conditional forces of the impact of the chamfer of the blade of the disk on the ground, the conditional normal reaction of the chamfer of the blade of the disc is determined. From another scheme of forces, the normal reaction of the lateral surface of the disc to the effects of the soil was revealed. The total volumetric energy costs for cutting soil with disks are obtained by adding the identified partial energy costs.

Conclusion. On the basis of the theoretical studies carried out, the volumetric energy costs for cutting the soil with disks have been calculated. To these it is necessary to add energy costs: for cutting the roots with the edges of the blades of the disks and for moving the disc ripper. The structure of known energy expenditure is dominated by the energy to overcome friction between the soil and the side surface of the disk. Since the energy costs for cutting soil with disks are very high, it is impractical to use them in the unit for the formation of the underlying layer. This does not exclude the use of disc rippers for other purposes.

KEYWORDS. Soil, disc, disc ripper, cutting, analysis, strength, energy expenditure

The article was submitted 21.11.2021; approved after reviewing 24.12.2021; accepted for publication 28.02.2022.

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. Energy costs for cutting soil with disks analysis. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (1): 12-23. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-12-23>

© Nikolayev V.A., 2022



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1) на основе конструктивной компоновки дискового рыхлителя определено расстояние и время перемещения дискового рыхлителя для разработки грунта объёмом один кубический метр;

2) разработана методика определения затрат энергии: на отделение пласта грунта от его массива, разделение пласта на фрагменты, преодоление напора грунта на фаску диска, ускорение грунта фаской лезвия диска, преодоление трения между грунтом и фаской лезвия диска, преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска;

3) приведён пример расчёта этих частных затрат энергии на разработку грунта объёмом один кубический метр;

4) вычислены суммарные объёмные затраты энергии на резание грунта дисками.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании агрегата для формирования подстилающего слоя (патент РФ №2689007) [1, 2, 3] возникла проблема выбора рабочих органов, предназначенных для предварительного рыхления поверхностного слоя грунта, насыщенного корнями растений, с целью последующего обнажения подстилающего слоя строящейся автомобильной дороги. Необходимо было рассмотреть вариант использования для этой цели пассивных дисков.

При выборе рабочих органов технических средств следует учитывать многие факторы. Однако решающим показателем являются затраты энергии на единицу объёма обрабатываемого материала. Хотя теоретические основы резания грунта весьма подробно рассмотрены в работах^{1,2,3}[4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28], но, основываясь на них, сложно выявить и сопоставить затраты энергии на единицу объёма разрабатываемого грунта. Варианты определения действующих сил и затрат энергии на резание грунта дисками, изложенные различными авторами, предполагают решение весьма громоздких зависимостей. Они основаны на синтезном подходе

к решению проблемы. Не отвергая синтезный подход, сделаем анализ взаимодействия дисков с грунтом. Для предварительного резания грунта целесообразно использовать дисковый рыхлитель, агрегируемый с энергетическим устройством. Вычисление затрат энергии дискового рыхлителя будем осуществлять на основе выявленных ранее значений его геометрических, кинематических и динамических параметров [1].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При движении дискового рыхлителя [1] передний диск осуществляет зажатое резание грунта. Остальные диски осуществляют полужазаемое резание, так как режут и смещают последовательно грунт в пространство, созданное ранее прошедшим диском. Затраты энергии на разработку грунта передним диском, осуществляющим зажатое резание, равны сумме затрат энергии:

- на резание грунта лезвием диска;
- уплотнение грунта фасками лезвия;
- преодоление трения между грунтом и фасками лезвия;
- преодоление трения между грунтом и боковыми поверхностями диска.

Выполнение анализа затрат энергии на разработку грунта передним диском было бы весьма приблизительным, поскольку вычленив каждую составляющую затрат энергии даже теоретически сложно. Поэтому определим затраты энергии на резание грунта передним диском, используя результаты предыдущих расчётов [1]. Были выявлены: горизонтальная составляющая $R_{з\text{ пер}}$ сопротивления перемещению переднего диска, погружённого в грунт на глубину a , скорость агрегата v_d , время $\tau_{д,р}$ разработки одного кубического метра грунта агрегатом в составе энергетического устройства и дискового рыхлителя. Потребляемая мощность на резание грунта передним диском

$$N_{\text{общ пер}} = R_{з\text{ пер}} v_d. \quad (1)$$

Общие затраты энергии на резание грунта объёмом один кубический метр передним диском

¹ Курилов Е. В., Трошин Д. И. Косое резание грунта дисковым ножом: опыт проектирования и эксплуатации экскаваторных ковшей с подвижными боковыми стенками. Ярославль: ЯГТУ. 2017. 127 с.

² 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.

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

$$u_{\text{общ пер}} = N_{\text{общ пер}} \tau_{\partial p}. \quad (2)$$

Остальные диски осуществляют полузажатое резание грунта. Допустим, не многодисковый рыхлитель разрабатывает грунт, а один условный диск осуществляет полузажатое резание грунта шириной захвата $b' = 0,012 \text{ м}$. Тогда для разработки одного кубического метра грунта V_1 диск должен переместиться на расстояние

$$s_{\partial} = \frac{V_1}{a \cdot b'}. \quad (3)$$

Время перемещения

$$\tau_{\partial} = \frac{s_{\partial}}{v_{\partial}}. \quad (4)$$

Для анализа разделим диск на элементы: кромку лезвия, фаску лезвия и боковые поверхности диска. Затраты энергии на разработку грунта острым диском, осуществляющим полузажатое резание, равны сумме затрат энергии:

- на отделение пласта грунта от его массива;
- резание корней лезвием диска;
- разделение пласта на фрагменты;
- преодоление напора грунта на фаску диска;
- ускорение грунта фаской лезвия диска;
- преодоление трения между грунтом и фаской лезвия диска;
- преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска.

Во-первых, сложность анализа заключена в армированности верхнего слоя грунта корнями растений. Затраты энергии на резание корней кромкой лезвия диска можно определить только путём экспериментов, поэтому при теоретическом анализе допустим, что грунт не армирован корнями растений. Во-вторых, угловая скорость вращения диска является весьма приближительной. Чтобы провести теоретический анализ затрат энергии на резание грунта диском, допустим, что диск не вращается. При этом трансформацию угла заточки лезвия не учитываем. Угол i заточки диска не должен превышать угол трения между грунтом и сталью, который около 26° . Допустим, угол заточки диска 25° .

Затраты энергии, необходимые для отделения пласта грунта от его массива

Ширина отрыва пласта от массива грунта равна глубине разработки грунта a . Отделение пласта от массива грунта происходит микроотрывами. Заменим дискретный отрыв

элементов пласта от массива грунта единовременным явлением так, как будто сразу оторван пласт площадью, равной площади отрыва при разработке 1 м^3 грунта. Общая длина отрыва пласта от массива грунта объёмом один кубический метр равна s_{∂} . Площадь отрыва пласта от воздействия лезвия диска

$$S_{\text{отр } \partial} = a \cdot s_{\partial}. \quad (5)$$

Поскольку условно заменили дискретный отрыв элементов пласта от массива грунта единовременным явлением так, как будто сразу оторван пласт площадью, равной площади отрыва при разработке 1 м^3 грунта, то и силу, необходимую для единовременного отделения пласта объёмом один кубический метр, назовём условной силой.

При отрыве пласта от массива грунт испытывает деформацию растяжения. Примем для полузажатого резания со скольжением предел прочности грунта на растяжение σ_p^e . Общая условная сила воздействия передней кромки лезвия одного условного ножа, необходимая для преодоления сцепления грунта,

$$F_{\Sigma \text{ отд д}} = \sigma_p^e \cdot S_{\text{отр } \partial}. \quad (6)$$

Примем величину перемещения грунта при отрыве $h_{\text{отр}}$. Энергия на преодоление сцепления пласта с массивом при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$u_{\text{отр } \partial} = F_{\Sigma \text{ отр } \partial} h_{\text{отр}}. \quad (7)$$

Затраты энергии на разделение пласта на фрагменты

После отделения от массива грунта пласт попадает на фаску лезвия диска, которая, изгибая пласт, разделяет его на фрагменты. Пласт разделяется на фрагменты не по плоскостям, а по поликриволинейным поверхностям. Чтобы отразить увеличение затрат энергии в результате разделения пласта по поликриволинейным поверхностям, примем коэффициент $k_{yп}$, учитывающий увеличение площади поликриволинейной поверхности в сравнении с плоскостью и наличие трещин-ответвлений. Он зависит от свойств грунта и толщины отделяемого пласта: чем больше толщина пласта, тем больше следует принимать в теоретических расчётах коэффициент $k_{yп}$. В теоретических расчётах среднее расстояние, на котором происходит разделение пласта на фрагменты, можно принять равным пути агрегата, на котором произойдёт один микроотрыв, $l_{\text{отр}}$. Площадь отделения одного фрагмента от

другого определим как произведение коэффициента k_{yp} , глубины разработки грунта a и ширины срезаемого диском слоя грунта b' :

$$S_{фр} = k_{yp}ab'. \quad (8)$$

Количество разрывов пласта от воздействия диска на расстоянии общей длины отрыва пласта от массива грунта объемом один кубический метр

$$n_{пл\delta} = \frac{s_{\delta}}{l_{отр}}. \quad (9)$$

Суммарная площадь разрывов пласта

$$S_{\Sigma фр} = S_{фр}n_{пл\delta}. \quad (10)$$

Условная сила воздействия кромки лезвия диска, необходимая для разделения пласта грунта на фрагменты,

$$F_{\Sigma фр} = \sigma_p^s S_{\Sigma фр}. \quad (11)$$

Примем величину перемещения отделяемого фрагмента грунта $h_{отр}$. Энергия, необходимая для разделения пласта на фрагменты, при разработке грунта объемом один кубический метр,

$$u_{фр} = F_{\Sigma фр}h_{отр}. \quad (12)$$

Затраты энергии на преодоление напора грунта на фаску диска

На основании относительности движения допустим, что не диск преодолевает сопротивление грунта, а отрезанный пласт грунта набегаёт на фаску лезвия диска со скоростью v_{δ} . Заменим постепенное воздействие грунта на фаску лезвия диска одномоментным воздействием всей массы, сосредоточенной в слое при разработке одного кубического метра грунта. Мгновенная сила $F_{\delta-\delta}$ набегающего грунта равна силе его инерции:

$$F_{\delta-\delta} = jm_{\delta-\delta} = \rho \frac{v_{\delta-\delta}}{\tau_{\delta-\delta}} (v_{\delta} - v_{кон}),$$

где $m_{\delta-\delta}$ – масса грунта, воздействующего на фаску диска в секунду; $v_{кон}$ – конечная скорость набегающего грунта. Так как глубина разработки грунта a , ширина срезаемого диском слоя грунта b' , объем грунта, непосредственно воздействующего на фаску диска в секунду,

$$\frac{v_{\delta-\delta}}{\tau_{\delta-\delta}} = a_{\delta}b'v_{\delta}. \quad (13)$$

Допустим, плотность грунта ρ . Масса грунта, воздействующего на фаску диска в секунду,

$$m_{\delta-\delta} = \rho \cdot \frac{v_{\delta-\delta}}{\tau_{\delta-\delta}}. \quad (14)$$

Допустим, конечная скорость набегающего грунта $v_{кон} = 0$. Казалось бы, конечная скорость набегающего грунта не должна быть равна нулю, так как диск вращается. Однако, во-первых, было принято допущение, что диск неподвижен. Во-вторых, используем диск гладкий, без вырезов и выступов, поэтому для набегающего грунта безразлично вращение диска. Тогда мгновенная сила набегающего грунта

$$F_{\delta-\delta} = m_{\delta-\delta} \cdot v_{\delta}. \quad (15)$$

Время перемещения диска на расстояние s_{δ} при разработке грунта объемом один кубический метр τ_{δ} . Условная сила воздействия грунта, набегающего на фаску диска, при разработке грунта объемом один кубический метр

$$F_{\Sigma \delta-\delta} = F_{\delta-\delta}\tau_{\delta}. \quad (16)$$

Энергия, затрачиваемая на преодоление напора грунта на фаску диска,

$$u_{\delta-\delta} = F_{\delta-\delta}s_{\delta}. \quad (17)$$

Затраты энергии на ускорение грунта фаской диска

Отрезанный пласт грунта набегаёт на фаску лезвия диска, тормозится ею. Одновременно фаска лезвия диска ускоряет фрагменты пласта грунта в сторону. Сдвиг грунта в сторону фаской лезвия диска происходит на величину толщины диска b (рисунок 1). Ввиду связности грунта и небольшого расстояния сдвига предположим, что сдвиг происходит перпендикулярно направлению движения агрегата. Предположим также, что время ускорения каждого фрагмента пласта грунта определяет путь $s_{пф\delta}$ перемещения этого фрагмента по фаске лезвия диска. Начальная скорость грунта перпендикулярна направлению движения агрегата и равна нулю: $v_{нач} = 0$. Скорость поступательного перемещения диска v_{δ} . Так как вектор скорости грунта до взаимодействия с фаской диска направлен горизонтально, параллельно направлению движения агрегата, то конечная скорость грунта перпендикулярна направлению движения агрегата при сходе с фаски:

$$v_{пф\delta} = v_{\delta} \tan 25^{\circ}. \quad (18)$$

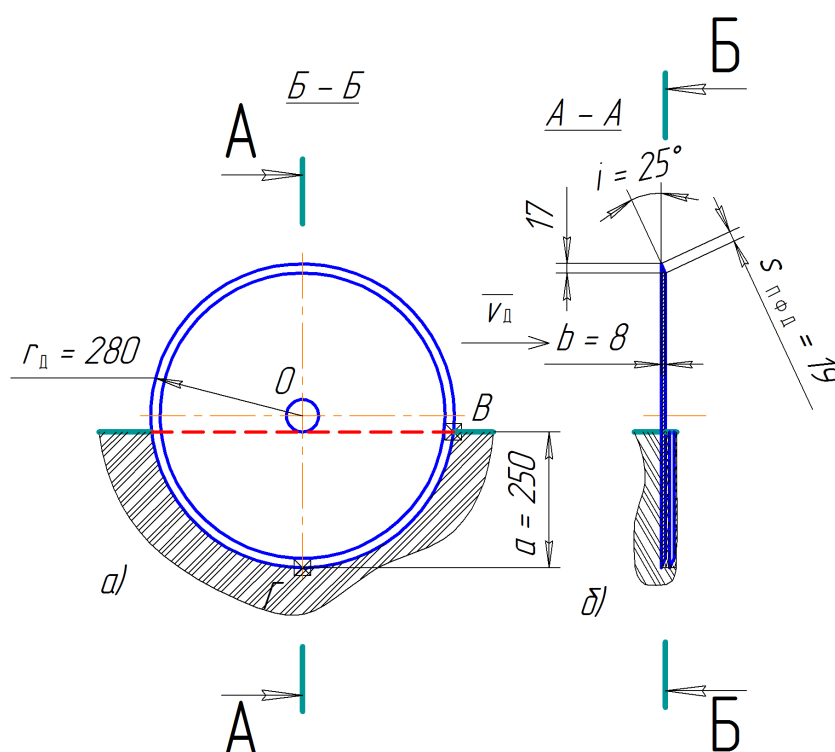


Рисунок 1 – К определению пути перемещения фрагмента грунта по фаске лезвия диска: а – сечение Б – Б; б – сечение А – А. Составлено автором

Figure 1 – To determine the path of a soil fragment along the chamfer of a disc blade: а – section Б – Б; б – section А – А. Compiled by the author

Поскольку угол заточки лезвия диска 25° меньше угла трения грунта о сталь, примем скорость грунта вдоль фаски диска равной скорости v_∂ . Время перемещения грунта по фаске на расстояние $s_{пф\partial}$:

$$\tau_\phi = \frac{s_{пф\partial}}{v_\partial}. \quad (19)$$

Векторы скоростей отдельных частиц грунта в результате воздействия на них фаски диска могут иметь различное направление, однако преимущественным будет направление, перпендикулярное направлению движения агрегата. Допустим, все частицы грунта в результате воздействия на них фаски диска получают ускорение, направление которого перпендикулярно направлению движения агрегата. Тогда ускорение, создаваемое фаской лезвия диска, равно отношению скорости $v_{пф\partial}$ отрезанного слоя грунта на сходе с фаски в направлении, перпендикулярном направлению движения агрегата, к времени τ_ϕ пере-

мещения грунта по фаске. Ускорение грунта фаской в направлении, перпендикулярном направлению движения агрегата,

$$a_{пф\partial} = \frac{v_{пф\partial} - v_{нач}}{\tau_\phi}. \quad (20)$$

Масса грунта объемом один кубический метр, разрыхляемого одним условным диском, $m_{общ\partial}$. Условная сила инерции грунта, препятствующая его перемещению фаской в направлении, перпендикулярном движению агрегата,

$$F_{\Sigma jпф\partial} = a_{пф\partial} m_{общ\partial}. \quad (21)$$

Затраты кинетической энергии на перемещение грунта фаской лезвия диска в направлении, перпендикулярном движению агрегата,

$$u_{пф\partial} = \frac{m_{общ\partial} v_{пф\partial}^2}{2}. \quad (22)$$

Затраты энергии на преодоление трения между грунтом и фаской лезвия диска

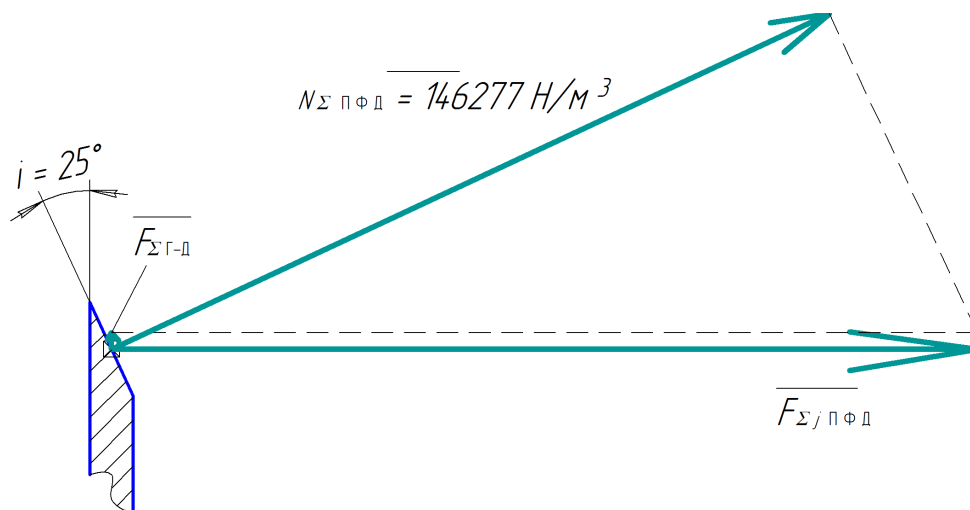


Рисунок 2 – Схема условных сил воздействия фаски лезвия диска на грунт.
Составлено автором

Figure 2 – Diagram of the conditional forces of the blade chamfer on the soil.
Compiled by the author

На рисунке 2 сложим: условную силу $F_{\Sigma \Gamma-\Delta}$ воздействия поступающего грунта на фаску и условную силу $F_{j \Pi \Phi}$ инерции грунта в направлении, перпендикулярном движению агрегата, спроецировав их на направление, перпендикулярное поверхности фаски лезвия диска.

Из рисунка 2 условная нормальная реакция фаски лезвия диска. Она равна нормальной реакции фаски лезвия диска, как будто бы фаска одновременно воздействует на грунт объемом один кубический метр. Так как все составляющие её силы изменяются со средней частотой, равной пути микроотрыва грунта, её следует привести к этому расстоянию. Приведенную нормальную реакцию фаски к расстоянию определим из пропорции:

$$F_{omp \partial} = F_{\Sigma \text{отд}} \frac{l_{omp}}{s_{\partial}}; \quad (23)$$

Сила трения грунта о фаску лезвия диска

$$F_{m \phi \partial} = f N_{\phi \partial}. \quad (24)$$

Общий путь грунта по фаске лезвия диска s_{∂} . Энергия на преодоление трения грунта о фаску лезвия диска

$$u_{m \phi \partial} = F_{m \phi \partial} \cdot s_{\partial}. \quad (25)$$

Затраты энергии на преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска

Определим затраты энергии на преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска, исходя из известных сил с последующей корректировкой результата.

На нормальную реакцию боковой поверхности диска оказывают влияние:

- сила воздействия передней кромки лезвия диска, необходимая для преодоления сцепления грунта, и направленная перпендикулярно фаске лезвия диска;
- сила воздействия кромки лезвия диска, необходимая для разделения пласта грунта на фрагменты, направленная также перпендикулярно фаске лезвия диска;
- сила инерции грунта, препятствующая его перемещению фаской в направлении, перпендикулярном движению агрегата;
- сила $F_{m \phi \partial}$ трения грунта о фаску лезвия диска.

Все условные силы рассчитаны на разработку грунта объемом один кубический метр одним условным диском. Путь диска при разработке грунта объемом один кубический метр s_{∂} . Приведём условные силы к расстоянию микроотрыва l_{omp} :

$$F_{omp \partial} = F_{\Sigma \text{отд}} \frac{l_{omp}}{s_{\partial}}; \quad (26)$$

$$F_{\phi \partial} = F_{\Sigma \phi \partial} \frac{l_{omp}}{s_{\partial}}; \quad (27)$$

$$F_{j \Pi \Phi \partial} = F_{j \Pi \Phi} \frac{l_{omp}}{s_{\partial}}. \quad (28)$$

Приложим к фрагменту диска силы воздействия диска на грунт и определим нормальную реакцию боковой поверхности

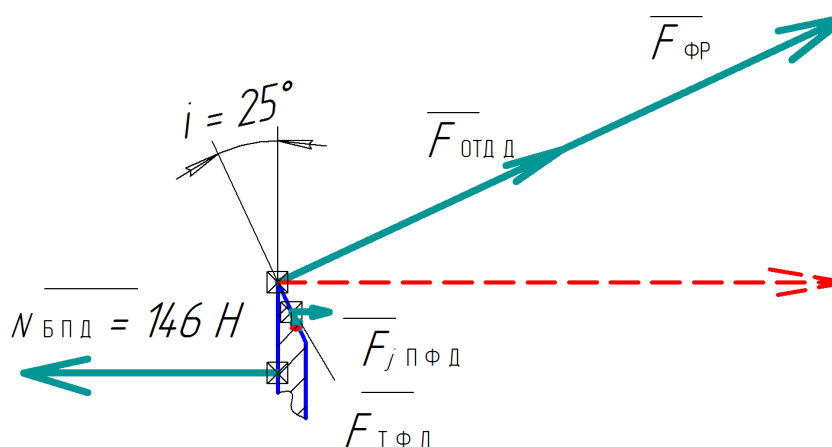


Рисунок 3 – Схема сил к определению нормальной реакции боковой поверхности диска на воздействие грунта.
Составлено автором

Figure 3 – Force diagram to determine the normal reaction of the disc side to the soil.
Compiled by the author

диска (рисунок 3). Силы $F_{отр\partial}$ и $F_{фр}$ приложим к кромке лезвия фрагмента диска, силы $F_{жпф\partial}$ и $F_{тф\partial}$ – к фаске лезвия. Спроецируем силы $F_{отр\partial}$, $F_{фр}$, $F_{тф\partial}$ на направление, перпендикулярное плоскости диска (основная штриховая линия). Сложив эти проекции и силу $F_{жпф\partial}$, получим равнодействующую силу, перпендикулярную плоскости диска (на рисунке не показана). Нормальная реакция $N_{бп\partial}$ боковой поверхности диска на воздействие грунта направлена в противоположную сторону, но не равна равнодействующей силе. Большая доля равнодействующей силы компенсируется упругостью диска и передается на раму дискового рыхлителя.

Для решения проблемы примем гипотезу: нормальная реакция боковой поверхности диска на воздействие грунта пропорциональна доле боковой поверхности диска, погруженной в грунт. Сила трения грунта о боковую поверхность диска

$$F_{тбп\partial} = f N_{бп\partial}. \quad (29)$$

Энергия на преодоление трения грунта о боковую поверхность диска

$$u_{тбп\partial} = F_{тбп\partial} S_{\partial}. \quad (30)$$

Объемные затраты энергии на резание грунта дисками

Суммарные объемные затраты энергии на резание грунта дисками, кроме энергии на резание корней,

$$\Sigma u_{\partial} = u_{общ\ пер} + u_{отр\partial} + u_{фр} + u_{э-\partial} + u_{пф\partial} + u_{тф\partial} + u_{тбп\partial}. \quad (31)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Допустим, диск погружен в грунт на глубину $a = 0,25$ м. Для выявления затрат энергии на резание грунта объемом один кубический метр агрегатом в составе энергетического устройства и дискового рыхлителя используем результаты предыдущих расчетов [1]: горизонтальная составляющая сопротивления перемещению переднего диска, погруженного в грунт на глубину a , $R_{э\ пер} = 4260$ Н. Скорость агрегата $v_{\partial} = 2$ м/с. Время разработки одного кубического метра грунта $\tau_{\partial p} = 1,85$ с.

Потребляемая мощность на резание грунта передним диском (1):

$$N_{общ\ пер} = 4260 \cdot 2 = 8605 \text{ Вт}.$$

Объемные затраты энергии на резание грунта передним диском (2):

$$u_{общ\ пер} = 8605 \cdot 1,85 = 15919 \text{ Дж/м}^3.$$

Допустим, не многодисковый рыхлитель, а один условный диск осуществляет полужатое резание грунта шириной захвата $b' = 0,012$ м. Тогда для разработки одного кубического метра грунта этот диск должен переместиться на расстояние (3): $s_{\partial} = \frac{1}{0,25 \cdot 0,012} \approx 333 \text{ м/м}^3$.

Время перемещения на это расстояние (4): $\tau_{\partial} = \frac{333}{2,02} = 164,85 \text{ с/м}^3$.

Площадь отрыва пласта от воздействия лезвия диска (5):

$$S_{отр\delta} = 0,25 \cdot 333 = 83,25 \text{ м}^2/\text{м}^3 = \\ = 83250000 \text{ мм}^2/\text{м}^3.$$

Примем для полузажатого резания со скольжением предел прочности грунта на растяжение $\sigma_p^g = 0,04 \text{ МПа}$. Условная сила воздействия передней кромки лезвия одного условного диска, необходимая для преодоления сцепления грунта (6),

$$F_{\Sigma \text{отд}\delta} = 0,04 \cdot 83250000 = 3330000 \text{ Н/м}^3.$$

Примем величину перемещения грунта при отрыве $h_{отр} = 1 \text{ мм}$. Энергия на преодоление сцепления пласта с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр (7):

$$u_{отр\delta} = 3330000 \cdot 0,001 = 3330 \text{ Дж/м}^3.$$

Примем коэффициент, учитывающий увеличение площади поликриволинейной поверхности в сравнении с плоскостью и наличие трещин-ответвлений, $k_{уп} = 1,5$ для пласта грунта толщиной 12 мм. Примем среднее расстояние, на котором происходит разделение пласта на фрагменты равным пути агрегата, на котором произойдёт один микроотрыв, $l_{отр} \approx 18 \text{ мм} = 0,018 \text{ м}$. Площадь отделения одного фрагмента от другого (8):

$$S_{фр} = 1,5 \cdot 250 \cdot 12 = 4500 \text{ мм}^2.$$

На $s_{\delta} = 333 \text{ м}$ расстоянии произойдёт разрывов пласта от воздействия диска (9):

$$n_{пл\delta} = \frac{333}{0,018} = 18500.$$

Суммарная площадь разрывов пласта (10):

$$S_{\Sigma фр} = 4500 \cdot 18500 = 83250000 \text{ мм}^2.$$

Условная сила воздействия кромки лезвия диска, необходимая для разделения пласта грунта на фрагменты (11),

$$F_{\Sigma фр} = 0,04 \cdot 83250000 = 3330000 \text{ Н/м}^3.$$

Примем величину перемещения при разделении пласта на фрагменты $h_{отр} = 1 \text{ мм}$. Энергия на разделение пласта на фрагменты при разработке грунта объёмом один кубический метр (12):

$$u_{фр} = 3330000 \cdot 0,001 = 3330 \text{ Дж/м}^3.$$

Отрезанный пласт грунта набегаёт на фаску лезвия диска со скоростью $v_{\delta} = 2 \text{ м/с}$. Глубина разработки грунта $a = 0,25 \text{ м}$, ширина срезаемого диском слоя грунта $b' = 0,012 \text{ м}$. Объём грунта, непосредственно воздействующего на фаску диска в секунду (13), $\frac{V_{\delta-\delta}}{\tau_{\delta-\delta}} = 0,25 \cdot 0,012 \cdot 2,02 \approx 0,006 \text{ м}^3/\text{с}$.

Допустим, плотность грунта $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$. Масса грунта, воздействующего на фаску диска в секунду (14), $m_{\delta-\delta} = 1600 \cdot 0,006 = 9,6 \text{ кг/с}$.

Допустим, конечная скорость набегающего грунта $v_{кон} = 0$. Тогда мгновенная сила $F_{\delta-\delta}$ набегающего грунта равна (15): $F_{\delta-\delta} = 9,6 \cdot 2 = 19,4 \text{ Н/с}$.

Время перемещения диска на расстояние s_{δ} при разработке грунта объёмом один кубический метр $\tau_{\delta} = 164,85 \text{ с/м}^3$. Условная сила воздействия грунта, набегающего на фаску диска, при разработке грунта объёмом один кубический метр (16): $F_{\Sigma \delta-\delta} = 19,4 \cdot 164,85 \approx 3197 \text{ Н/м}^3$.

Энергия, необходимая на преодоление напора грунта на фаску диска (17), $u_{\delta-\delta} = 19,4 \cdot 333 = 6460 \text{ Дж/м}^3$.

Сдвиг грунта в сторону фаской лезвия диска происходит на величину $b = 0,008 \text{ м}$ (см. рисунок 1). Угол заточки лезвия диска 25° без учёта его трансформации. Перемещение грунта по фаске лезвия диска $s_{пф\delta} = 19 \text{ мм}$ [1]. Начальная скорость грунта перпендикулярна направлению движения агрегата и равна нулю: $v_{нач} = 0$. Скорость диска параллельна направлению движения агрегата $v_{\delta} = 2 \text{ м/с}$. Конечная скорость грунта перпендикулярна направлению движения агрегата при сходе с фаски (18): $v_{пф\delta} = 2 \cdot 0,4663 = 0,94 \text{ м/с}$.

Время перемещения грунта по фаске на это расстояние $s_{пф\delta}$ (19): $\tau_{ф} = \frac{0,019}{2,02} = 0,0094 \text{ с}$.

Ускорение грунта фаской (20): $a_{пф\delta} = \frac{0,94-0}{0,0094} = 100 \text{ м/с}^2$.

Масса грунта объёмом один кубический метр, разрыхляемого одним диском, $m_{общ\delta} = 1600 \text{ кг/м}^3$ [1]. Условная сила инерции грунта, препятствующая его перемещению фаской в направлении, перпендикулярном движению агрегата (21),

$$F_{\Sigma jпф\delta} = 100 \cdot 1600 = 160000 \text{ Н/м}^3.$$

Затраты кинетической энергии на перемещение грунта фаской лезвия диска в направлении, перпендикулярном движению агрегата (22),

$$u_{пф\delta} = \frac{1600 \cdot 0,94^2}{2} \approx 707 \text{ Дж/м}^3.$$

Из рисунка 2 совокупная условная нормальная реакция фаски лезвия диска $N_{\Sigma пф\delta} = 146277 \text{ Н/м}^3$. Так как все составляющие её силы изменяются со средней частотой, равной пути $l_{опр}$, её следует привести к этому расстоянию. Приведенную нормальную реакцию фаски к расстоянию $l_{опр}$ определим из пропорции (23): $N_{пф\delta} = 146277 \frac{0,018}{333} \approx 8 \text{ Н}$.

Сила трения грунта о фаску лезвия диска (24):

$$F_{тф\delta} = 0,5 \cdot 8 = 4 \text{ Н}.$$

Путь грунта по фаске лезвия диска $s_{\delta} = 333 \text{ м}$. Энергия на преодоление трения грунта о фаску лезвия диска (25): $u_{тф\delta} = 4 \cdot 333 = 1332 \text{ Дж/м}^3$.

Путь диска при разработке грунта объёмом один кубический метр $s_{\delta} = 333 \text{ м}$. Приведём обобщённые силы к расстоянию микроотрыва $l_{опр} = 0,018 \text{ м}$ (26, 27, 28):

Соответственно,

$$F_{опр\delta} = 3330000 \frac{0,018}{333} = 180 \text{ Н};$$

$$F_{фр} = 3330000 \frac{0,018}{333} \approx 180 \text{ Н};$$

$$F_{пф\delta} = 160000 \frac{0,018}{333} = 8,6 \text{ Н}.$$

Приложим к фрагменту диска силы воздействия диска на грунт и определим результирующую силу (см. рисунок 3). Из построений (см. рисунок 1), если всю боковую плоскость диска принять равной 1, доля боковой поверхности диска, погружённой в грунт, равна 0,437. Нормальная реакция боковой поверхности диска на воздействие грунта $N_{бп\delta} = 336 \cdot 0,437 = 146 \text{ Н}$.

Сила трения грунта о боковую поверхность диска (29):

$$F_{тбп\delta} = 0,5 \cdot 146 = 73 \text{ Н}.$$

Энергия на преодоление трения грунта о боковую поверхность диска (30):

$$u_{тбп\delta} = 73 \cdot 333 = 48895 \text{ Дж/м}^3.$$

Суммарные объёмные затраты энергии на резание грунта дисками (31):

$$\Sigma u_{\delta} = 15919 + 3330 + 3330 + 6460 + 707 + 1332 + 48895 = 79816 \text{ Дж/м}^3.$$

Затраты энергии на резание корней кромкой лезвия диска можно получить только экспериментальным путём. Их следует прибавить к суммарным объёмным затратам энергии. Структура вычисленных затрат энергии на резание грунта дисками показана на рисунке 4.

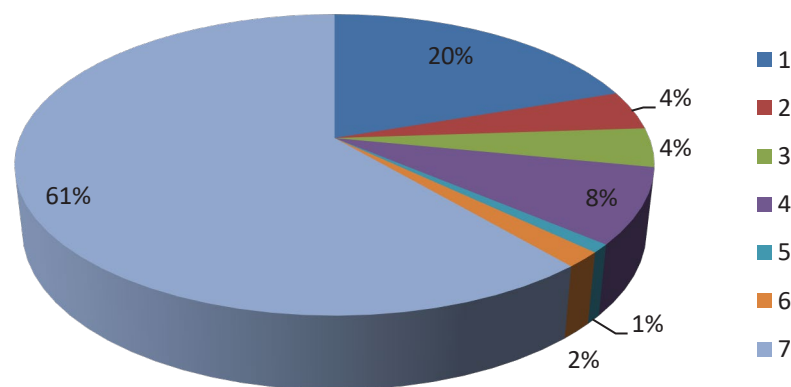


Рисунок 4 – Структура затрат энергии на резание грунта дисками:
 1 – энергия на резание грунта передним диском; 2 – энергия на отделение пласта грунта от его массива; 3 – энергия на разделение пласта на фрагменты; 4 – энергия на преодоление напора грунта на фаску диска; 5 – энергия на ускорение грунта фаской лезвия диска; 6 – энергия на преодоление трения между грунтом и фаской лезвия диска; 7 – энергия на преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска.
 Составлено автором

Figure 4 – Structure of energy consumption for cutting soil with discs: 1 – energy for cutting soil with front disc; 2 – energy for separation of soil layer from its massif; 3 – energy for splitting soil layer into fragments; 4 – energy for overcoming soil pressure on disc bevel; 5 – energy for soil acceleration by disc blade bevel; 6 – energy for overcoming friction between soil and disc blade chamfer; 7 – energy for overcoming friction between soil and lateral surface of disc.
 Compiled by the author

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых теоретических исследований выявлены объёмные затраты энергии на резание грунта дисками: $u_{общ\text{ред}} = 79816$ Дж/м³. К ним необходимо добавить затраты энергии: на резание корней кромками лезвий дисков, на перемещение дискового рыхлителя. В структуре известных затрат энергии преобладает энергия на преодоление трения между грунтом и боковой поверхностью диска. Так как затраты энергии на резание грунта дисками весьма велики, в агрегате для формирования подстилающего слоя их применение нецелесообразно. Это не исключает применение дисковых рыхлителей для других целей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николаев В. А. Геометрические, кинематические и динамические параметры дискового рыхлителя // Вестник СибАДИ. 2021. № 5. С. 476–487.
2. Николаев В. А. Анализ взаимодействия кромки лезвия консольного ножа с грунтом // Вестник СибАДИ. 2020. № 2. С. 172–181.
3. Николаев В. А. Затраты энергии на резание грунта ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги // Вестник СибАДИ. 2020. №6. С. 676–688.
4. Карасёв Г. Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. № 4. С. 36–42.
5. 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.
6. Кравец И. М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // Строительные и дорожные машины. 2010. № 5. С. 47–49.
7. Кириллов Ф. Ф. Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многолезвьевых рабочих органов землеройных машин // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 44–48.
8. Берестов Е. И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 34–38.
9. 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.
10. 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.
11. Ryabets N., Kurzner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. P. 115-128.
12. 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.
13. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. // Cold Regions Science and Technology. 2013. Vol. 86. P. 142-166.
14. 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.
15. Li Q. Development of Frozen Soil Model. // Advances in Earth Science. 2006. №12. P. 96-103.
16. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007. 448 p.
17. 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.
18. Нилов В. А., Фёдоров Е. В. Разработка грунта скрепером в условиях свободного резания // Строительные и дорожные машины. 2016. № 2. С. 7–10.
19. Чмиль В. П. Насосно-аккумулятивный привод рыхлителя с автоматическим выбором угла резания // Строительные и дорожные машины. 2016. № 11. С. 18–20.
20. 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.
21. Сёмкин Д. С. О влиянии скорости рабочего органа на силу сопротивления резанию грунта // Вестник СибАДИ. 2017. № 1. С. 37–43.
22. Константинов Ю. В. Методика расчёта сопротивления и момента сопротивления резанию почвы прямым пластинчатым ножом фрезы // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 5. С. 31–39.
23. 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.
24. 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.
25. 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.

REFERENCES

1. Nikolaev V.A. Geometric, kinematic and dynamic parameters of the disk ripper. The Russian Automobile and Highway Industry Journal, 2021. 5: 476-487.
2. Nikolayev V.A. Analiz vzaimodeystviya kromki lezviya konsol'nogo nozha s gruntom [Analysis of the interaction of the edge of the cantilever knife blade with the ground]. The Russian Automobile and Highway Industry Journal, 2020. 2: 172-181. (In Russian)

3. Nikolaev V.A. Zatraty jenerгии na rezanie grunta kovshami agregata nepreryvnogo dejstviya dlja formirovaniya podstilajushhego sloja avtodorogi [Energy Expenditure on ground cutting by buckets of the unit of continuous action to form the underlying layer of the road]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020. 6: 676-688. (In Russian)
4. Karasyev G.N. Opredelenie sily rezaniya grunta s uchytom uprugih deformacij pri razrushenii [Determination of the cutting force of the soil, taking into account elastic deformations during destruction] *Construction and road machinery*, 2008. 4: 36-42. (In Russian)
5. Karnaukhov A.I., Orlovskiy S.N. Opredelenie zatrat udel'noj energii na process rezaniya lesnyh pochv torcevyimi frezam [Determination of the cost of specific energy for the process of cutting forest soils with end mills]. *Construction and road machinery*, 2010. 1: 20-22. (In Russian)
6. Kravets I.M. Opredelenie kriticheskoy glubiny rezaniya pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezoz [Determination of the critical cutting depth for combined cutting of soils with a hydrophreeze]. *Construction and road machinery*, 2010. 5: 47-49. (In Russian)
7. Kirillov F.F. Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo usiliya dlya mnogorezcovykh rabochih organov zemlerojnyh mashin. *Construction and road machinery*, 2010. No11. Pp. 44-48. (In Russian).
8. Berestov E.I. Vliyaniye treniya grunta po poverhnosti nozha na soprotivleniye rezaniyu. *Construction and road machinery*, 2010. No 11. Pp. 34-38.
9. Vershinin A.V., Subov V.S., Tyulnev A.M. Povysheniye effektivnosti diskofreznykh rabochih mekhanizmov dlya razrabotki myorzlykh gruntov. *Construction and road machinery*, 2012. No 8. Pp. 42-44.
10. Balovnev V.I., Nguen Z.SH. Opredeleniye soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelyu prochnosti [Determination of resistances in the development of soils with a ripper according to the integral strength index]. *Construction and road machines*, 2005. 3: 38-40. (In Russian)
11. Ryabets N., Kurzhner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. *Cold Regions Science and Technology*. 2003. 36: 115-128.
12. 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.
13. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. *Cold Regions Science and Technology*. 2013. 86: 142-166.
14. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scopic damage development of frozen soil under triaxial shearing. *Rock and Soil Mechanics*. 2005. 8: 150-163.
15. Li Q. Development of Frozen Soil Model. *Advances in Earth Science*. 2006. 12: 96-103.
16. Atkinson J. *The Mechanics of Soils and Foundations*. CRC. Press. 2007: 448.
17. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.YU. Issledovanie upravlyaemykh nozhevykh sistem zemlerojnyh mashin [Research of controlled knife systems of earthmoving and transport machines]. *Construction and road vehicles*, 2017. 2: 12-15.
18. Nilov V.A., Fyodorov E.V. Razrabotka grunta skreperom v usloviyakh svobodnogo rezaniya [Development of the soil with a scraper in the conditions of free cutting]. *Construction and road machines*, 2016. 2: 7-10.
19. CHmil' V.P. Nasosno-akkumulyativnyj privod ryhlitelya s avtomaticheskimi vyborom ugla rezaniya [Pump-accumulator drive of the ripper with automatic selection of the cutting angle]. *Construction and road machines*, 2016. 11: 18-20.
20. Kabashev R.A., Turgumbaev S.D. Eksperimental'nye issledovaniya processa kopaniya gruntov rotornno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [Experimental studies of the process of soil digging by rotary-disk working bodies under hydrostatic pressure]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2016. 4: 23-28. (In Russian)
21. Syomkin D.S. O vliyaniy skorosti rabochego organa na silu soprotivleniya rezaniyu grunta [On the influence of the speed of the working body on the strength of the resistance to cutting the soil]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. 1: 37-43. (In Russian)
22. Konstantinov YU.V. Metodika raschyota soprotivleniya i momenta soprotivleniya rezaniyu pochvy pryamym plastinchatym nozhom frezy [Method of calculating the resistance and moment of resistance to cutting the soil with a straight plate cutter knife]. *Tractors and agricultural machines*, 2019. 5: 31-39. (In Russian)
23. Syromyatnikov YU.N., Hramov I.S., Vojnash S.A. Gibkij element v sostave rabochih organov rotornoj pochvoobrabatyvayushchej ryhlitel'no-separiruyushchej mashiny [Flexible element in the composition of the working bodies of the rotary tillage loosening and separating machine]. *Tractors and agricultural machines*, 2018. 5: 32-39. (In Russian)
24. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoj analiz mekhanizmov peremeshcheniya rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin po zadanoj traektorii [Power analysis of the mechanisms of movement of working bodies of tillage machines along a given trajectory]. *Tractors and agricultural machines*, 2018. 1: 47-54. (In Russian)
25. Dranyaev S.B., CHatkin M.N., Koryavin S.M. Modelirovaniye raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvayushchej frezy [Simulation of the operation of a screw L-shaped knife of a tillage cutter]. *Tractors and agricultural machines*, 2017. 7: 13-19. (In Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolaev, Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machines Department.