

Научная статья

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-548-559>

EDN: LACWPD



РАСЧЁТ НЕОБХОДИМОЙ МОЩНОСТИ НА ПРИВОД НАКОНЕЧНИКА МАЛОГО РОТОРА

В. А. НиколаевЯрославский государственный технический университет,
г. Ярославль, РоссияNikolaev53@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-7503-6612>

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема ускорения и удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания комплекса агрегатов непрерывного действия. Агрегаты, следуя друг за другом, осуществляют весь комплекс работ, направленных на строительство автодорог. Одним из элементов агрегата непрерывного действия, формирующего кювет, является прямоточный роторный рыхлитель. Выявлено, что для выемки грунта вблизи оси вращения ротора прямоточного роторного рыхлителя должен быть установлен, соосно с большим ротором, малый ротор с большей угловой скоростью. Малый ротор содержит наконечник малого ротора со спиральными ножами, два зубца и два ножа. Ранее определена конструктивная компоновка малого ротора, рассчитана высота спирали спирального ножа. Путём анализа взаимодействия элементов рабочих органов прямоточного роторного рыхлителя с грунтом необходимо выявить мощность на привод наконечника малого ротора.

Методика исследования. Разработаны методики расчётов: мощности на внедрение конуса в грунт, мощности на трение конуса о грунт, мощности на внедрение торца спирального ножа в грунт, мощности на внедрение спирального ножа в грунт в радиальном направлении, мощности на преодоление трения спирального ножа о грунт, мощности на преодоление силы противодействия грунта вращению спирального ножа.

Результаты. На основе разработанных методик произведены расчёты параметров. Из пространственных моделей сил взаимодействия с грунтом спирального ножа выявлены их равнодействующие, нормальные силы, силы противодействия грунта вращению спирального ножа, вычислены силы трения грунта о задние поверхности первого и второго витка спирального ножа. Рассчитана суммарная мощность на привод наконечника малого ротора и объёмная энергия на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт.

Заключение. Суммарная мощность на привод наконечника малого ротора включает: мощность на внедрение конуса в грунт; мощность на трение конуса о грунт; мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт; мощность на внедрение спирального ножа в грунт в радиальном направлении; мощность на преодоление трения спирального ножа о грунт; мощность на преодоление силы противодействия грунта вращению спирального ножа. Необходимая мощность на привод наконечника малого ротора 1127 Вт. Объёмная энергия на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт 16,9 кДж/куб. м.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, автодороги, агрегаты непрерывного действия, прямоточный роторный рыхлитель, малый ротор, наконечник, спиральный нож

Статья поступила в редакцию 05.07.2023; одобрена после рецензирования 10.08.2023; принята к публикации 24.10.2023.

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. Расчёт необходимой мощности на привод наконечника малого ротора // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 5 (93). С. 548-559. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-548-559>

© Николаев В. А., 2023

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-548-559>

EDN: LACWPD

REQUIRED POWER CALCULATION TO SMALL ROTOR TIP DRIVE

Vladimir A. Nikolaiev

Yaroslavl Technical University,

Yaroslavl, Russia

Nikolaiev53@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-7503-6612>

ABSTRACT

Introduction. The problem of accelerating and reducing the cost of road construction without reducing their quality can be solved by creating a complex of continuous units. The units, following each other, carry out the whole range of works aimed at the construction of roads. One of the elements of the continuous unit that forms the cuvette is a direct-flow rotary ripper. It was revealed that for excavation near the axis of rotation of the rotor of a direct-flow rotary ripper, a small rotor with a higher angular velocity coaxially with a large rotor should be installed. The small rotor contains of a small rotor tip with spiral knives, two teeth and two knives. Previously, the structural layout of the small rotor was determined, the height of the spiral of the spiral knife was calculated. By analyzing the interaction of the elements of the working bodies of the direct-flow rotary ripper with the soil, it is necessary to identify the power on the drive of the tip of the small rotor.

The method of research. The calculation methods of power for the introduction of a cone into the ground, power for friction of the cone on the ground, power for the introduction of the end of the spiral knife into the ground, power for the introduction of a spiral knife into the ground in the radial direction, power to overcome the friction of the spiral knife on the ground, power to overcome the force of resistance of the soil to the rotation of the spiral knife have been developed.

Results. On the basis of the developed methods, the parameters were calculated. From the spatial models of the forces of interaction with the soil of the spiral knife, their resultant, normal forces, the forces of resistance of the soil to the rotation of the spiral knife are revealed, the friction forces of the soil on the rear surfaces of the first and second turns of the spiral knife are calculated. The total power for the drive of the tip of the small rotor and the volumetric energy for the introduction of a cone with a spiral knife into the ground are calculated.

Conclusion. The total power for the drive of the tip of the small rotor includes power for the introduction of the cone into the ground, power for friction of the cone on the ground, power for the introduction of the end of the spiral knife into the ground; power for the introduction of a spiral knife into the ground in the radial direction, power to overcome the friction of the spiral knife on the ground, power to overcome the force of resistance of the soil to the rotation of the spiral knife. The required power to drive the tip of the small rotor is 1127 W. The volumetric energy for the introduction of a cone with a spiral knife into the ground is 16.9 kJ / cubic meter.

KEYWORDS: construction, roads, continuous units, direct-flow rotary ripper, small rotor, tip, spiral knife

The article was submitted 05.07.2023; approved after reviewing 10.08.2023; accepted for publication 24.10.2023.

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. Vladimir A. Nikolaiev Required power calculation to small rotor tip drive. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (5): 548-559. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-548-559>

© Nikolaiev V. A., 2023



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1) разработаны методики расчётов: мощности на внедрение конуса в грунт, мощности на трение конуса о грунт, мощности на внедрение торца спирального ножа в грунт, мощности на внедрение спирального ножа в грунт в радиальном направлении, мощности на преодоление трения спирального ножа о грунт, мощности на преодоление силы противодействия грунта вращению спирального ножа;

2) разработана методика построения пространственных моделей сил взаимодействия с грунтом спирального ножа;

3) из пространственных моделей сил взаимодействия с грунтом спирального ножа выявлены их равнодействующие, нормальные силы, силы противодействия грунта вращению спирального ножа, вычислены силы трения грунта о задние поверхности первого и второго витка спирального ножа;

4) рассчитана суммарная мощность на привод наконечника малого ротора и объёмная энергия на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема ускорения и удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания комплекса агрегатов непрерывного действия [1]. Агрегаты, следуя друг за другом, осуществляют весь комплекс работ, направленных на строительство автодорог. Одним из элементов агрегата непрерывного действия, формирующего кювет, является прямоточный роторный рыхлитель^{1,2}. Установлено [2], что оптимальная скорость агрегата. Путём логических рассуждений, расчётов, построений в плоскости

и пространстве определены геометрические и режимные параметры большого ротора прямоточного роторного рыхлителя диаметром 1 метр [3]. Определён предельно малый радиус расположения окружных и торцевых ножей большого ротора. Выявлено, что для выемки грунта вблизи оси вращения ротора прямоточного роторного рыхлителя должен быть установлен, соосно с большим ротором, малый ротор с большей угловой скоростью.

Хотя теоретические основы разработки грунта весьма подробно рассмотрены^{3,4,5,6,7} [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21], взаимодействие с грунтом элементов прямоточного роторного рыхлителя почти не изучено. Применение прямоточных роторных рыхлителей для разработки грунта сдерживается недостаточным теоретическим обоснованием их параметров. Ранее в [22, 23] определена конструктивная компоновка малого ротора, рассчитана высота спирали спирального ножа. Путём анализа взаимодействия элементов рабочих органов прямоточного роторного рыхлителя с грунтом необходимо выявить мощность на привод наконечника малого ротора.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Суммарная требуемая мощность на привод наконечника малого ротора включает несколько составляющих:

- мощность на внедрение конуса в грунт;
- мощность на трение конуса о грунт;
- мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт;
- мощность на внедрение спирального ножа в грунт в радиальном направлении;
- мощность на преодоление трения спирального ножа о грунт;

¹ Патент РФ № 2735497. Прямоточный роторный рыхлитель / Николаев В.А.; заявл. 09.01.2019 №2019100367; опубл. 03.11.2020, Бюл. №31. 14 с.

² Патент РФ № 2709849. Агрегат непрерывного действия, формирующий кювет и основание автомобильной дороги / В.А. Николаев; заявл. 17.03.2020; № 2020111163; опубл. 23.12.2019, Бюл. № 36. 13 с.

³ Зыков Б. И. Теория рабочих процессов строительных машин: Учеб. пособие / Б. И. Зыков; М-во образования Рос. Федерации. Яросл. гос. техн. ун-т. Ярославль : [Яросл. гос. техн. ун-т], 2003 (Тип. ЯГТУ). 114 с.

⁴ Жук А. Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ротационного плуга // Теория и расчёт почвообрабатывающих машин: сборник научных трудов. М.: Машиностроение, 1989. Т. 120. С. 145–153.

⁵ Попов Г. Ф. Рабочие органы фрез: материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. М.: ОНТИ ВИСХОМ, 1970. С. 490–497.

⁶ Баловнев [и др.] Машины для земляных работ: конструкции, расчёт, потребительские свойства: учебное пособие для вузов: в 2 кн. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. 401 с.

⁷ Исследования рабочих органов землеройных машин непрерывного действия: Обзор / З. Е. Гарбузов, Г. А. Матушев, Г. Б. Нарет, Л. Н. Смирнов; Под общ. ред. канд. техн. наук З. Е. Гарбузова. - Москва : [б. и.], 1966. 89 с. : ил.; 21 см. (Серия I «Строительные и дорожные машины» / М-во строит., дор. и коммун. машиностроения СССР. Науч.-исслед. ин-т информации по строит., дор. и коммун. машиностроению).

- мощность на преодоление силы противодействия грунта вращению спирального ножа.

а) Мощность на внедрение конуса в грунт

Допустим, конус без спирального ножа внедряем в грунт. Сила, внедряющая конус в грунт [29],

$$4F_{к1} = \frac{f_{с-г} k p \pi r l}{\cos 15^\circ}, \quad (1)$$

где $f_{с-г}$ – коэффициент трения грунта о сталь; k – коэффициент, учитывающий увеличение удельного сопротивления грунта по мере его уплотнения конусом; p – удельное сопротивление грунта; r – радиус основания конуса; l – длина образующей; 15° – угол между направлением движения агрегата и образующей конуса. Если подойти строго, следовало бы в числителе вычесть площадь конуса, расположенную под спиральным ножом, но так как она относительно невелика, ею пренебрегаем.

Совокупная сила $4F_{к1} = F_{к1} + F_{к2}$ [22]. Радиальная сила $4F_{п1}$ [22] условно приложена с одной стороны конуса, но, если конус заглублён, действует на него в радиальном направлении со всех сторон. Для расчёта на прочность нужно знать максимальную радиальную силу, приложенную к наконечнику малого ротора. Наиболее опасное положение конструкции наконечника малого ротора будет тогда, когда конус заглублён наполовину. В этом положении радиальная сила действует на конус с одной стороны. Если конус заглублён наполовину, то

$$4F_{п1} = \frac{4F_{к1}}{2 \cdot \tan 15^\circ}. \quad (2)$$

Затраты энергии на внедрение конуса в грунт на один метр пути агрегата

$$E_k = 4F_{к1} s. \quad (3)$$

Скорость агрегата v_a . Мощность на внедрение конуса в грунт

$$N_k = 4F_{к1} v_a. \quad (4)$$

б) Мощность на трение конуса о грунт

Допустим, конус без спирального ножа внедряем в грунт. Сила трения конуса о грунт [29]:

$$4F_{т1} = f_{с-г}. \quad (5)$$

Затраты энергии на трение конуса о грунт на один метр пути агрегата

$$E_{тк} = 4F_{т1} s. \quad (6)$$

Скорость агрегата v_a . Мощность на трение конуса о грунт

$$N_{тк} = 4F_{т1} v_a. \quad (7)$$

Исключим влияние внедряющего конуса на грунт, окружающий конус. Примем в расчёт лишь прямое воздействие конуса на грунт в пределах его диаметра. Диаметр наконечника малого ротора d_n . Вычислим расстояние, на которое должен переместиться агрегат, чтобы объём прямого воздействия конуса на грунт был один кубический метр,

$$s = \frac{4 \cdot 1}{\pi d_n^2}. \quad (8)$$

Объёмные затраты энергии на внедрение конуса в грунт и трение конуса о грунт

$$E_{кV} = \frac{(E_k + E_{тк}) s}{10^3}. \quad (9)$$

в) Мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт

Торец спирального ножа, то есть начало его первого витка, при вращении наконечника малого ротора внедряется в грунт около вершины конуса, где уплотнение грунта конусом незначительное [23]. Поэтому уплотнение грунта конусом не учитываем. Рассмотрим внедрение торца спирального ножа, как резание грунта пуансоном. Сила $F_{тс}$, необходимая для внедрения торца спирального ножа в грунт, равна произведению удельного сопротивления грунта p на площадь сечения спирального ножа $S_{сеч}$. Высота витка спирального ножа h . Площадь сечения спирального ножа [23]

$$S_{сеч\ c} = h \cdot h \tan 20^\circ = h^2 \tan 20^\circ; \quad (10)$$

$$F_{тс} = p S_{сеч\ c} = p h^2 \tan 20^\circ.$$

Плечо этой силы [23] $h_{F_{тс}}$. Вращающий момент, необходимый для внедрения торца спирального ножа в грунт,

$$M_{тс} = F_{тс} h_{F_{тс}}. \quad (11)$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{мр}$, поэтому мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт

$$N_{тс} = M_{тс} \omega_{мр}. \quad (12)$$

г) Мощность на внедрение спирального ножа в грунт в радиальном направлении

Условные силы $F_{с1}$ и $F_{с2}$ воздействия спирального ножа на грунт, параллельные оси малого ротора, можно определить по формулам:

$$F_{с1} = k p S_{1с} \cos \beta_1; F_{с2} = k p S_{2с} \cos \beta_2 \quad [23]. \quad (13)$$

Однако если при расчёте высоты спирального ножа коэффициент k , учитывающий увеличение удельного сопротивления грунта по мере его уплотнения конусом, принимали постоянным, то при расчёте энергии на внедрение лезвия спирального ножа в грунт его следует принять для второго витка спирального ножа большим, чем для первого витка. Площади передних поверхностей витков спирального ножа равны произведению высоты h витка спирального ножа на соответствующие длины l_{c1} и l_{c2} средних линий витков. Тогда формулы (13) будут иметь вид

$$F_{c1} = k_1 phl_{c1} \cos \beta_1; F_{c2} = k_2 phl_{c2} \cos \beta_2. \quad (14)$$

Удельное сопротивление грунта p , высота витка спирального ножа h . Длины средних линий витков спирального ножа [23]:

$$\begin{aligned} \text{первого витка} - l_{c1} &= 31,14h + 55,6; \\ \text{второго витка} - l_{c2} &= 31,24h + 127. \end{aligned} \quad (15)$$

Средний наклон оснований витков спиралей принят: первой – $\beta_1=30^\circ$, второй – $\beta_2=15,75^\circ$ [23]. Условные силы, внедряющие конус в грунт, параллельные оси малого ротора [23], F_{c1} и F_{c2} (рисунок 1).

Условными силами воздействия грунта на спиральный нож их назовём потому, что они на рисунке показаны сосредоточенными, действующими в продольно-вертикальной плоскости, воздействующими лишь на фрагмент спирального ножа. Реальные силы распределены по поверхности спирального ножа. Витки спирального ножа при ввинчивании в грунт разрежут его и переместятся на расстояние $s=11,5$ мм в радиальном направлении в положение, показанное штриховыми линиями. Радиальному перемещению передних поверхностей витков спирального ножа противодействуют условные силы $F_{п\ c1}$ и $F_{п\ c2}$. Эти условные силы приложены к точкам A и B передних поверхностей сечений, соответственно, первого и второго витка спирального ножа. Радиальному перемещению задних поверхностей витков спирального ножа противодействуют условные силы $F_{з\ c1}$ и $F_{з\ c2}$. Эти условные силы приложены к точкам C и D задних поверхностей сечений, соответственно, первого и второго витка спирального ножа. Рассматривая резание спиральным ножом грунта в радиальном направлении как резание пуансоном, можно определить эти силы:

$$F_{\Pi c1} = k_1 p b_{\Pi c1} l_{c1}; F_{\Pi c2} = k_2 p b_{\Pi c2} l_{c2}; \quad (16)$$

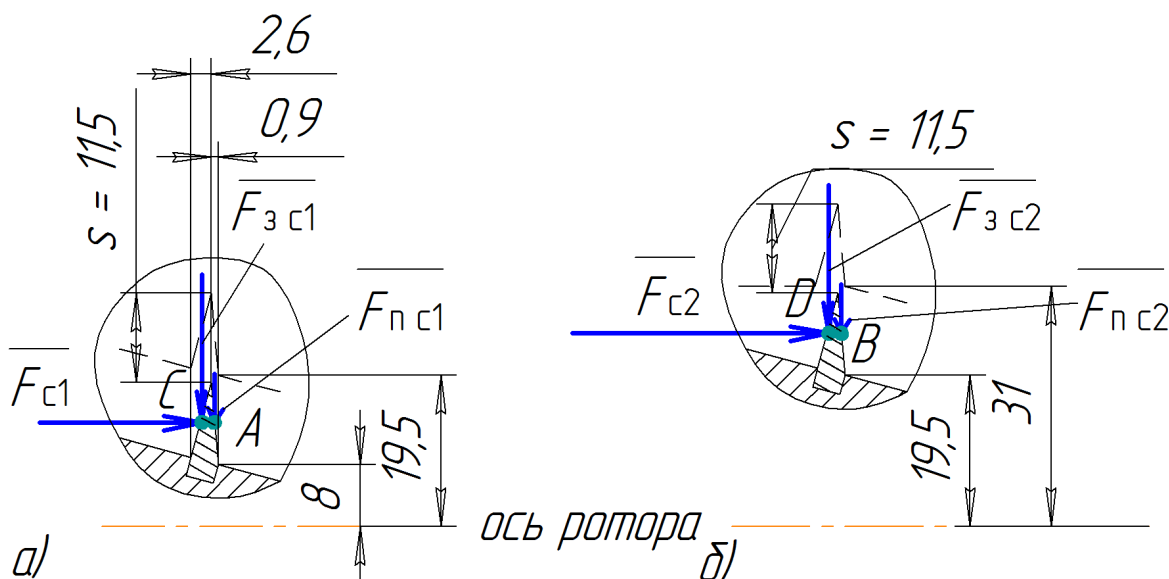


Рисунок 1 – Схема условных сил воздействия грунта на спиральный нож в продольной плоскости:
а – на первый виток; б – на второй виток
Источник: составлено автором.

Figure 1 –Diagram of the conditional forces with impact of soil on the spiral knife in the longitudinal plane:
a – on the first turn; b – on the second turn
Source: compiled by the authors.

$$F_{3c1} = k_1 p b_{3c1} l_{c1}; F_{3c2} = k_2 p b_{3c2} l_{c2}. \quad (17)$$

Ширина воздействия передней поверхности спирального ножа, из рисунка 1, $b_{пс1} = b_{пс2}$. Ширина воздействия задней поверхности спирального ножа $b_{зс1} = b_{зс2}$. Длины средних линий витков спирального ножа, соответственно, l_{c1}, l_{c2} .

Так как перемещение витков спирального ножа в радиальном направлении при ввинчивании в грунт на один оборот $s = 11,5 \text{ мм} = 0,0115 \text{ м}$ [23], то энергия на внедрение спирального ножа в грунт

$$E_{вс} = (F_{пс1} + F_{пс2} + F_{зс1} + F_{зс2})s. \quad (18)$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{мр} = 12,9 \text{ рад/с}$. За секунду витки спирального ножа сделают обороты, перемещая грунт в радиальном направлении,

$$n_{мр} = \frac{\omega_{мр}}{2\pi}. \quad (19)$$

Мощность, необходимая для внедрения спирального ножа в грунт в радиальном направлении,

$$N_{вс} = E_{вс} n_{мр}. \quad (20)$$

д) *Мощность на преодоление трения спирального ножа о грунт*

На рисунке 2 показана пространственная схема сил воздействия грунта на фрагмент (жёлтый) поверхности первого витка спирального ножа. Условно изобразим силы сосредоточенными. На переднюю поверхность первого витка спирального ножа действует сила $F_{пс1}$ (сиреневый вектор). Нормальная реакция передней поверхности на эту силу (малый тёмно-синий вектор) очень мала. Сила трения грунта о переднюю поверхность спирального ножа незначительная.

На заднюю поверхность первого витка спирального ножа действует сила $F_{зс1}$ (коричневый вектор) и сила $F_{с1}$ (зелёный вектор). Сложив эти силы, из пространственной модели получим равнодействующую $R_{зс1}$ (голубой вектор). Разложим равнодействующую на нормальную силу $N_{зс1}$ (синий вектор) и силу противодействия грунта вращению спирального ножа $F_{прс1}$ (серый вектор). Примем коэффициент трения стали о грунт $f_{с-г}$. Сила трения грунта о заднюю поверхность первого витка спирального ножа $F_{тзс1} = f_{с-г} N_{зс1}$ (красный вектор).

На рисунке 3 показана пространственная схема сил воздействия грунта на фрагмент (жёлтый) поверхности второго витка спирального ножа (цвет векторов аналогичный). Силы, воздействующие на переднюю поверхность второго витка спирального ножа, не показаны, так как сила трения грунта о переднюю поверхность спирального ножа незначительна.

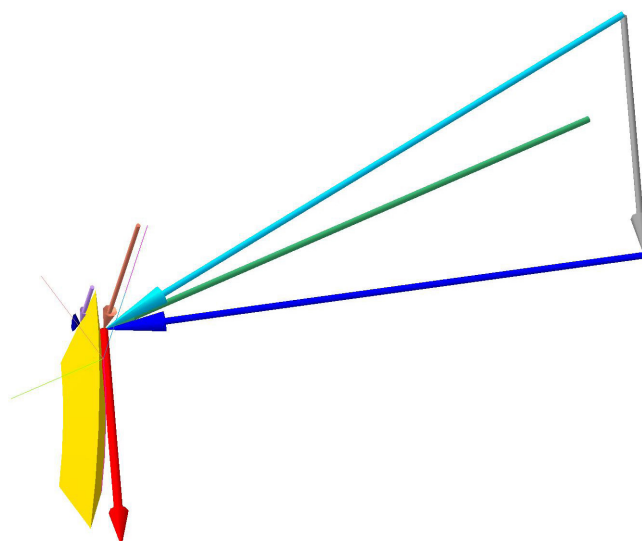


Рисунок 2 – Пространственная схема сил воздействия грунта на первый виток спирального ножа
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Spatial diagram of the forces with soil impact on the first turn of the spiral knife
Source: compiled by the authors.

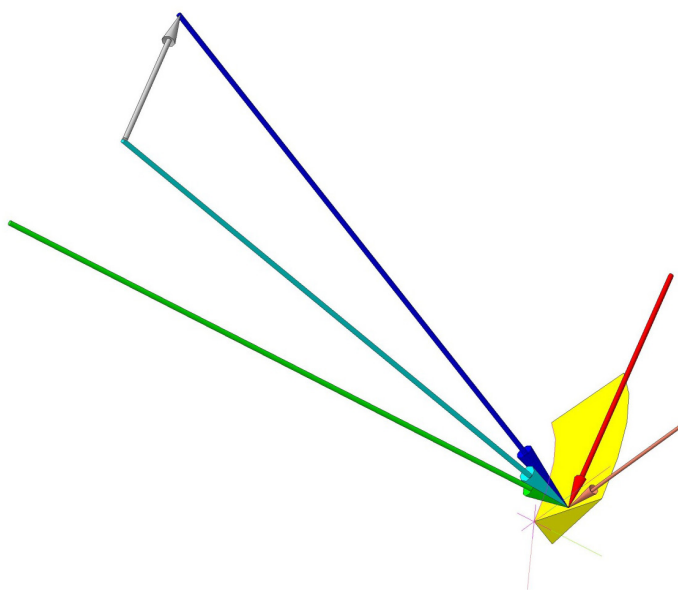


Рисунок 3 – Пространственная схема сил воздействия грунта на второй виток спирального ножа
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Spatial diagram of the forces with soil impact on the second turn of the spiral knife
Source: compiled by the authors.

В результате построений получены: равнодействующая R_{3c2} (голубой вектор), нормальная сила N_{3c2} (синий вектор) и сила противодействия грунта вращению спирального ножа $F_{пр c2}$ (серый вектор). Сила трения грунта о переднюю поверхность второго витка спирального ножа $F_{т3c2} = f_{с-г} N_{3c2}$ (красный вектор).

Среднее плечо силы трения первого витка спирального ножа [23]:

$$h_{F_{т3c1}} = \frac{(8+19,5)}{2} + \frac{h}{2}. \quad (21)$$

Вращающий момент, необходимый для преодоления силы трения первого витка спирального ножа о грунт,

$$M_{т3c1} = F_{т3c1} h_{F_{т3c1}}. \quad (22)$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{мр}$. Мощность на преодоление силы трения первого витка спирального ножа о грунт

$$N_{тc1} = M_{т3c1} \omega_{мр}. \quad (23)$$

Среднее плечо силы трения второго витка спирального ножа [23]:

$$h_{F_{т3c2}} = \frac{(19,5+31)}{2} + \frac{h}{2}. \quad (24)$$

Вращающий момент, необходимый для преодоления силы трения второго витка спи-

рального ножа о грунт,

$$M_{т3c2} = F_{т3c2} h_{F_{т3c2}}. \quad (25)$$

Мощность на преодоление силы трения второго витка спирального ножа о грунт

$$N_{тc2} = M_{т3c2} \omega_{мр}. \quad (26)$$

Общая мощность на преодоление силы трения спирального ножа о грунт

$$N_{тc} = N_{тc1} + N_{тc2}. \quad (27)$$

е) Мощность на преодоление силы противодействия грунта вращению спирального ножа

Так как витки спирального ножа наклонены к поперечно-вертикальной плоскости, то возникают силы противодействия грунта вращению спирального ножа $F_{пр c1}$ и $F_{пр c2}$ (серые векторы на рисунках 2 и 3). Сила противодействия грунта вращению первого витка спирального ножа больше силы противодействия грунта вращению второго витка спирального ножа, так как угол наклона первого витка к поперечно-вертикальной плоскости больше, чем второго витка спирального ножа. Средние плечи этих сил $h_{F_{т3c1}}$ и $h_{F_{т3c2}}$. Вращающие моменты, необходимые для преодоления этих сил, соответственно:

$$M_{\text{пр c1}} = F_{\text{пр c1}} h_{F_{\text{т c1}}}; M_{\text{пр c2}} = F_{\text{пр c2}} h_{F_{\text{т c2}}}. \quad (28)$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{\text{мр}}$. Мощность на преодоление сил противодействия грунта вращению первого и второго витка спирального ножа:

$$N_{\text{пр c1}} = M_{\text{пр c1}} \omega_{\text{мр}}; N_{\text{пр c2}} = M_{\text{пр c2}} \omega_{\text{мр}}. \quad (29)$$

Мощность на преодоление противодействия грунта вращению витков спирального ножа

$$N_{\text{пр c}} = N_{\text{пр c1}} + N_{\text{пр c2}}. \quad (30)$$

Суммарная требуемая мощность на привод спирального ножа

$$N_{\text{с}} = N_{\text{к}} + N_{\text{т к}} + N_{\text{в с}} + N_{\text{т с}} + N_{\text{пр с}}; \quad (31)$$

Перемещение агрегата для разработки грунта объёмом один кубический метр:

$$s = 1 \cdot \frac{\pi D_{\text{в}}^2 p}{4}. \quad (32)$$

Объёмная энергия на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт

$$u_{\text{к+с}} = \frac{N_{\text{с}}}{\tau} = \frac{N_{\text{с}} s}{v_{\text{а}} \cdot 10^3}, \quad (33)$$

где $v_{\text{а}}$ – скорость агрегата; τ – время перемещения агрегата для разработки грунта объёмом один кубический метр.

РЕЗУЛЬТАТЫ

а) Мощность на внедрение конуса в грунт

Допустим, что конус без спирального ножа внедряем в грунт. Коэффициент трения грунта о сталь примем $f_{\text{с-г}} \approx 0,5$. Коэффициент k , учитывающий увеличение удельного сопротивления грунта по мере его уплотнения конусом, зависит от многих факторов, поэтому его следует уточнять в конкретных расчётах, основываясь на экспериментальных данных. Для ориентировочного расчёта примем $k=1,2$. Удельное сопротивление грунта $p = \sigma_{\text{см}}^{\text{в}} = 0,3$ МПа. Радиус основания конуса [22] $r=31$ мм, длина образующей $l=120$ мм. Сила, внедряющая конус в грунт (1),

$$F_{\text{к1}} = \frac{0,5 \cdot 1,2 \cdot 0,3 \cdot 3,14 \cdot 31 \cdot 120}{0,966} = 2176 \text{ Н}.$$

Если конус заглублён наполовину, максимальная радиальная сила, приложенная к наконечнику малого ротора (2):

$$4F_{\text{н1}} = \frac{2176}{2 \cdot 0,268} = 4060 \text{ Н}.$$

Затраты энергии на внедрение конуса в грунт на один метр пути агрегата (3):

$$E_{\text{к}} = 4F_{\text{к1}} s; E_{\text{к}} = 2176 \text{ Дж/м}.$$

Скорость агрегата $v_{\text{а}}=0,085$ м/с. Мощность на внедрение конуса в грунт (4):

$$N_{\text{к}} = 2176 \cdot 0,085 = 185 \text{ Вт}.$$

б) Мощность на трение конуса о грунт

Допустим, конус без спирального ножа внедряем в грунт. Сила трения конуса о грунт (5):

$$4F_{\text{т1}} = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 0,3 \cdot 3,14 \cdot 31 \cdot 120 = 2102 \text{ Н}.$$

Затраты энергии на трение конуса о грунт на один метр пути агрегата (6):

$$E_{\text{т к}} = 2102 \text{ Дж/м}.$$

Скорость агрегата $v_{\text{а}}=0,085$ м/с. Мощность на трение конуса о грунт (7):

$$N_{\text{т к}} = 2102 \cdot 0,085 \approx 180 \text{ Вт}.$$

Диаметр наконечника малого ротора $d_{\text{н}}=62$ мм=0,062 м [29]. Расстояние, на которое должен переместиться агрегат, чтобы объём прямого воздействия конуса на грунт был один кубический метр, (8):

$$s = \frac{4 \cdot 1}{\pi d_{\text{н}}^2}; s = \frac{4}{3,14 \cdot 0,062^2} = 333,333 \text{ м}.$$

Объёмные затраты энергии на внедрение конуса в грунт и трение конуса о грунт (9):

$$E_{\text{к в}} = \frac{(2176+2102) \cdot 333,333}{10^3} = 1426 \text{ кДж/м}^3.$$

в) Мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт

Предположим, удельное сопротивление грунта $p=0,3$ МПа. Высота витка спирального ножа $h=10$ мм [30]. Сила, необходимая для внедрения торца спирального ножа в грунт (10),

$$F_{\text{т с}} = 0,3 \cdot 10^2 \cdot 0,364 \approx 11 \text{ Н}.$$

Плечо этой силы [30]
 $h_{F_{\text{т с}}} = 8 + h/2 = 13 \text{ мм} = 0,013 \text{ м}.$

Вращающий момент, необходимый для внедрения торца спирального ножа в грунт (11),

$$M_{тс} = 11 \cdot 0,013 = 0,143 \text{ Нм.}$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{мр} = 12,9 \text{ рад/с}$ [22], поэтому мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт (12) $N_{тс} = 0,143 \cdot 12,9 = 1,8 \text{ Вт}$.

Мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт незначительная, поэтому затратами энергии на внедрение торца спирального ножа в грунт можно пренебречь.

г) *Мощность на внедрение спирального ножа в грунт в радиальном направлении*

Высота витка спирального ножа $h = 10 \text{ мм}$ [23]. Длины средних линий витков спирального ножа (15):

$$\text{первого витка } l_{c1} = 31,14 \cdot 10 + 55,6 = 367 \text{ мм,}$$

$$\text{второго витка } l_{c2} = 31,24 \cdot 10 + 127 \approx 440 \text{ мм.}$$

Примем коэффициенты $k_1 = 1,1$, $k_2 = 1,3$. Удельное сопротивление грунта принято $p = 0,3 \text{ МПа}$. Средний наклон оснований витков спиралей принят: первой – $\beta_1 = 30^\circ$, второй – $\beta_2 = 15,75^\circ$. Условные силы, внедряющие конус в грунт, параллельные оси малого ротора (14),

$$F_{c1} = 1,1 \cdot 0,3 \cdot 10 \cdot 367 \cdot 0,866 \approx 1050 \text{ Н;}$$

$$F_{c2} = 1,3 \cdot 0,3 \cdot 10 \cdot 440 \cdot 0,962 \approx 1650 \text{ Н.}$$

Ширина воздействия передней поверхности спирального ножа, из рисунка 1, $a, b_{пс1} = b_{пс2} = 0,9 \text{ мм}$. Ширина воздействия задней поверхности спирального ножа $b_{зс1} = b_{зс2} = 2,6 \text{ мм}$. Длина средних линий витков спирального ножа, соответственно, $l_{c1} = 367 \text{ мм}$, $l_{c2} = 440 \text{ мм}$. Средние величины условных сил воздействия передней и задней поверхности спирального ножа на грунт в радиальном направлении (16,17):

$$F_{пс1} = 1,1 \cdot 0,3 \cdot 0,9 \cdot 367 = 109 \text{ Н;}$$

$$F_{пс2} = 1,3 \cdot 0,3 \cdot 0,9 \cdot 440 = 154 \text{ Н;}$$

$$F_{зс1} = 1,1 \cdot 0,3 \cdot 2,6 \cdot 367 = 315 \text{ Н;}$$

$$F_{зс2} = 1,3 \cdot 0,3 \cdot 2,6 \cdot 440 = 446 \text{ Н.}$$

Так как перемещение витков спирального ножа в радиальном направлении при ввинчивании в грунт на один оборот $s = 11,5 \text{ мм} = 0,0115 \text{ м}$ (см. рисунок 1, а), то энергия на внедрение спирального ножа в грунт (18):

$$E_{вс} = (109 + 154 + 315 + 446) \cdot 0,0115 = 11,776 \text{ Дж.}$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{мр} = 12,9 \text{ рад/с}$. За секунду витки спирального ножа сделают оборотов, перемещая грунт в радиальном направлении (19),

$$n_{мр} = \frac{12,9}{2 \cdot 3,14} \approx 2,054 \text{ об/с.}$$

Мощность, необходимая для внедрения спирального ножа в грунт в радиальном направлении (20),

$$N_{вс} = 11,776 \cdot 2,054 \approx 24 \text{ Вт.}$$

д) *Мощность на преодоление трения спирального ножа о грунт*

Из пространственной модели (см. рисунок 2) получим равнодействующую $R_{зс1} = 1096 \text{ Н}$ (голубой вектор). Разложим равнодействующую на нормальную силу $N_{зс1} = 962 \text{ Н}$ (синий вектор) и силу противодействия грунта вращению спирального ножа $F_{прс1} = 524 \text{ Н}$ (серый вектор). Примем коэффициент трения стали о грунт $f_{с-г} = 0,5$. Сила трения грунта о переднюю поверхность первого витка спирального ножа равна половине нормальной силы $N_{зс1}$, то есть $F_{тзс1} = 481 \text{ Н}$ (красный вектор).

В результате построений (см. рисунок 3) равнодействующая $R_{зс2} = 1710 \text{ Н}$ (голубой вектор), нормальная сила $N_{зс2} = 1650 \text{ Н}$ (синий вектор) и сила противодействия грунта вращению спирального ножа $F_{прс2} = 447 \text{ Н}$ (серый вектор). Сила трения грунта о переднюю поверхность второго витка спирального ножа равна половине нормальной силы $N_{зс2}$, то есть $F_{тзс2} = 825 \text{ Н}$ (красный вектор).

Среднее плечо силы трения первого витка спирального ножа (21):

$$h_{F_{тзс1}} = 13,75 + \frac{10}{2} = 18,75 \text{ мм} = 0,01875 \text{ м.}$$

Вращающий момент, необходимый для преодоления силы трения первого витка спирального ножа о грунт (22),

$$M_{тзс1} = 481 \cdot 0,01875 \approx 9 \text{ Нм.}$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{мр} = 12,9 \text{ рад/с}$. Мощность на преодоление силы трения первого витка спирального ножа о грунт (23):

$$N_{тс1} = 9 \cdot 12,9 \approx 116 \text{ Вт.}$$

Среднее плечо силы трения второго витка спирального ножа (24):

$$h_{F_{тзс2}} = 25,25 + \frac{10}{2} = 30,25 \text{ мм} = 0,03025 \text{ м.}$$

Вращающий момент, необходимый для преодоления силы трения второго витка спирального ножа о грунт (25),

$$M_{T3c2} = F_{T3c2} h_{F_{T3c2}};$$

$$M_{T3c2} = 825 \cdot 0,03025 \approx 25 \text{ Нм.}$$

Мощность на преодоление силы трения второго витка спирального ножа о грунт (26):

$$N_{Tc2} = 25 \cdot 12,9 \approx 322 \text{ Вт.}$$

Общая мощность на преодоление силы трения спирального ножа о грунт (27):

$$N_{Tc} = 116 + 322 = 438 \text{ Вт.}$$

е) *Мощность на преодоление силы противодействия грунта вращению спирального ножа*

Силы противодействия грунта вращению спирального ножа $F_{пр c1} = 524 \text{ Н}$ и $F_{пр c2} = 447 \text{ Н}$. Средние плечи этих сил $h_{F_{T3c1}} = 0,01875 \text{ м}$ и $h_{F_{T3c2}} = 0,03025 \text{ м}$. Вращающие моменты, необходимые для преодоления этих сил, соответственно (28):

$$M_{пр c1} = 524 \cdot 0,01875 = 9,8 \text{ Нм;}$$

$$M_{пр c2} = 447 \cdot 0,03025 = 13,5 \text{ Нм.}$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{мр} = 12,9 \text{ рад/с}$. Мощность на преодоление сил противодействия грунта вращению первого и второго витка спирального ножа (29):

$$N_{пр c1} = 9,8 \cdot 12,9 = 126 \text{ Вт;}$$

$$N_{пр c2} = 13,5 \cdot 12,9 = 174 \text{ Вт.}$$

Мощность на преодоление противодействия грунта вращению первого витка спирального ножа приблизительно в 1,5 раза меньше мощности противодействия грунта вращению второго витка спирального ножа, так как меньше среднее плечо силы.

Ранее [23] оставили первый виток спирального ножа без изменений, не укорачивая его. Результаты расчёта мощности противодействия грунта вращению первого и второго витка спирального ножа подтвердили правильность этого решения. Если укоротить первый виток спирального ножа, для соблюдения равновесия наконечника малого ротора необходимо будет увеличить высоту витков спирального ножа. Это приведёт к увеличению мощности на резание спиральным ножом, а также увеличению плеч сил, следовательно, к увеличению мощностей на преодоление силы трения спирального ножа о грунт и силы противодействия грунта вращению спирального ножа.

Мощность на преодоление противодействия грунта вращению витков спирального ножа (30):

$$N_{пр c} = 126 + 174 = 300 \text{ Вт.}$$

Суммарная требуемая мощность на внедрение, трение конуса и привод спирального ножа (31):

$$N_c = 185 + 180 + 24 + 438 + 300 = 1127 \text{ Вт.}$$

Скорость агрегата $v_a = 0,085 \text{ м/с}$. Перемещение агрегата для разработки грунта объёмом один кубический метр (32):

$$s = 1 \cdot \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} \approx 1,274 \text{ м.}$$

Объёмная энергия на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт (33):

$$u_{к+с} = \frac{1127 \cdot 1,274}{0,085 \cdot 10^3} = 16,9 \text{ кДж/м}^3.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммарная мощность на привод наконечника малого ротора включает: мощность на внедрение конуса в грунт; мощность на трение конуса о грунт; мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт; мощность на внедрение спирального ножа в грунт в радиальном направлении; мощность на преодоление трения спирального ножа о грунт; мощность на преодоление силы противодействия грунта вращению спирального ножа. Необходимая мощность на привод наконечника малого ротора $N_c = 1127 \text{ Вт}$. Объёмная энергия на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт $u_{к+с} = 16,9 \text{ кДж/м}^3$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Николаев В. А. Определение затрат энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт в начале прохода. *Вестник СибАДИ*. 2022;19(4):484-499. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>
2. Николаев В. А. Расчёт скорости прямооточного роторного рыхлителя // Дороги и мосты. Москва. 2019 выпуск 41/1. С. 35–39.
3. Николаев В. А. Конструктивная компоновка и режимные параметры большого ротора прямооточного роторного рыхлителя. *Вестник СибАДИ*. 2022;19(6):800-813. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-800-813>
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 многолезцовых 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. 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.

10. 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.

11. 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.

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

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

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

15. 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.

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

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

18. 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.

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

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

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. Николаев В. А. Конструктивная компоновка малого ротора прямооточного роторного рыхлителя // Вестник СибАДИ. 2023; 20 (2): 194–203. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-194-203>

23. Николаев В.А. Расчёт высоты витка спирального ножа // Вестник СибАДИ. 2023;20(3):326–336. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-326-336>. EDN: TTPPI

REFERENCES

1. Nikolayev V.A. Determination of the energy required to expose the surface of the knife and the bottom of the bulldozer blade to the ground at the beginning of the pass. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(4):484–499. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>

2. Nikolaev V. A. Raschjot skorosti prjamotochnogo rotornogo ryhlitelja [Calculation of the speed of the ramjet rotary ripper]. *Dorogi i mosty. Sbornik, vypusk 41/1*. Moskva. 2019: 35–39. (In Russ.)

3. Nikolayev V.A. Structural layout and operating parameters for a large rotor of a direct-flow bucket wheel type aggregator. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 800–813. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-800-813>.

4. Karasjov G. N. Opređenje 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.)

5. Karnauhov A. I., Orlovskij S. N. Opređenje zatrať udel'noj jenerгии na process rezanija lesnyh pochv torcevyymi 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.)

6. Kravec I. M. Opređenje 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.)

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

8. 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.)

9. Balovnev V. I., Nguen Z. Sh. Opređenje 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.)

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

11. 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.

12. Talalay P. G. Subglacial till and Bedrock drilling. *Cold Regions Science and Technology*. 2013; Vol. 86: 142-166.

13. Li Q. Development of Frozen Soil Model. *Advances in Earth Science*. 2006;12: 96-103.

14. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007: 448.

15. Balovnev V. I., Danilov R. G., Ulitich O. Ju. Issledovanie upravlyaemykh nozhevyykh sistem zemlerojno-transportnykh mashin [Study of guided knife systems of ground-moving vehicles]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2017; 2: 12-15. (In Russ.)

16. Nilov V. A., Fjodorov E. V. Razrabotka grunta skreperom v usloviyakh svobodnogo rezaniya [Ground development with a scraper in free cutting conditions]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 2: 7-10. (In Russ.)

17. Chmil' V. P. Nasosno-akkumuljativnyj privod ryhlitelja s avtomaticheskim vyborom ugla rezaniya [Pump-accumulating ripper drive with automatic cutting angle selection]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 11: 18-20. (In Russ.)

18. Kabashev R. A., Turgumbaev S. D. Jeksperimental'nye issledovaniya processa kopaniya gruntov rotno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [Experimental studies of the process of digging soils by rotary-disk working organs under hydrostatic pressure]. *Vestnik SibADI*. 2016; 4: 23-28. (In Russ.)

19. Sjomkin D.S. O vlijanii skorosti rabocheho organa na silu soprotivleniya rezaniju grunta [On the impact of the speed of the working body on the force of resistance to ground cutting]. *Vestnik SibADI*. 2017; 1: 37-43. (In Russ.)

20. Konstantinov Ju. V. Metodika raschjota soprotivleniya i momenta soprotivleniya rezaniju pochvy prjamym 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.)

21. Parhomenko G. G., Parhomenko S. G. Silovoj analiz mehanizmov peremeshheniya rabochih organov pochvoobrabatyvajushhih 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. Nikolaev V.A. Constructive layout for small rotor of straight-flow rotary ripper. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023;20(2):194-203. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-194-203>

23. Nikolayev V.A. Turn height calculation for spiral blade. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023;20(3):326-336. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-326-336>. EDN: TTTPI

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины», SPIN-код: 8865-0397.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolayev – Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machinery Department, SPIN-код: 8865-0397.