

Научная статья

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-326-336>

EDN: TTTPTI



## РАСЧЁТ ВЫСОТЫ ВИТКА СПИРАЛЬНОГО НОЖА

**В. А. Николаев***Ярославский государственный технический университет,  
г. Ярославль, Россия**Nikolaev53@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. Одним из элементов малого ротора является спиральный нож. Взаимодействие с грунтом спиральных ножей исследовано недостаточно.

**Методика исследования.** Рассмотрено взаимодействие с грунтом наконечника малого ротора со спиральными ножами. Углы наклона первого и второго витка спирали определены построением развёртки. Приняты допущения: соотношение сил, действующих на часть конуса со спиралью, к части конуса без спирали равно отношению длин образующих этих частей конуса; спиральный нож не тормозит агрегат и не ускоряет его, то есть сумму сил, противодействующих внедрению конуса в грунт, уравновешивают силы, внедряющие конус в грунт. Сумма условных нормальных реакций конуса на воздействие грунта равна произведению удельного сопротивления грунта на площадь поверхности конуса и на коэффициент, учитывающий увеличение удельного сопротивления грунта по мере его уплотнения конусом.

**Результаты.** На основе методики произведены расчёты и построения. Площадь передней поверхности витка спирального ножа приблизительно равна произведению высоты витка на длину его средней линии. Путём построений выявлена длина средней линии витков. Зависимости длин спирали от высоты витка спирального ножа показаны на рисунках. Установлены пределы углов наклона основания первого и второго витка спирального ножа. Определена высота витка спирального ножа.

**Заключение.** Построением развёртки определены углы наклона первого и второго витка спирали. Путём построения проекций на поперечно-вертикальную плоскость определены длины средних линий витков спирального ножа. На основании расчётов, с учётом изнашивания в процессе эксплуатации и искажения проекции спирали на поперечно-вертикальную плоскость, принята высота витка спирального ножа 10 мм.

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

**Статья поступила в редакцию 04.05.2023; одобрена после рецензирования 01.06.2023; принята к публикации 26.06.2023.**

**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 высоты витка спирального ножа // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 3 (91). С. 326-336. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-326-336>

© Николаев В. А., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-326-336>  
EDN: TTTPI

## TURN HEIGHT CALCULATION FOR SPIRAL BLADE

Vladimir A. Nikolayev

Yaroslavl Technical University,

Yaroslavl, Russia

[Nikolaev53@inbox.ru](mailto:Nikolaev53@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 should be installed, coaxially with a large rotor. The small rotor contains: a small rotor tip with spiral blades, two teeth and two knives. One of the elements of the small rotor is a spiral blade. The interaction with the soil of spiral blades has not been sufficiently studied.

**The method of research.** The interaction with the ground of the tip of a small rotor with spiral blades is considered. The angles of inclination of the first and second turns of the spiral are determined by the construction of the scan. The following assumptions are made: the ratio of the forces acting on the part of the cone with the spiral to the part of the cone without the spiral is equal to the ratio of the lengths of the cones forming these parts; The spiral blade does not slow down the unit and does not accelerate it, that is, the sum of the forces that counteract the introduction of the cone into the ground balances the forces that introduce the cone into the ground. The sum of the conditional normal reactions of the cone to the impact of the soil is equal to the product of the resistivity of the soil and the surface area of the cone and the coefficient that takes into account the increase in the resistivity of the soil as it is compacted by the cone.

**Results.** On the basis of the methodology, calculations and constructions were made. The area of the front surface of the turn of the spiral blade is approximately equal to the product of the height of the turn and the length of its midline. By construction, the length of the midline of the turns was revealed. The dependences of the length of the spiral on the height of the turn of the spiral blade are shown in the figures. The limits of the angles of inclination of the base of the first and second turns of the spiral blade are established. The height of the turn blade is determined.

**Conclusion.** The angles of inclination of the first and second turns of the spiral are determined by constructing the scan. By constructing projections on the transverse-vertical plane, the lengths of the middle lines of the spiral blade spins are determined. Based on the calculations, taking into account wear during operation and distortion of the projection of the spiral on the transverse-vertical plane, the height of the spiral blade is 10 mm.

**KEYWORDS:** construction, roads, continuous units, straight-flow rotary ripper, small rotor, tip, spiral blade

The article was submitted 04.05.2023; approved after reviewing 01.06.2023; accepted for publication 26.06.2023.

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

© Nikolayev V. A., 2023



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

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1) выявлены силы воздействия грунта на наконечник малого ротора со спиральными ножами;

2) разработана методика построения развёртки для определения углов наклона первого и второго витка спирали;

3) разработана методика построения проекций на поперечно-вертикальную плоскость для определения длин средних линий витков спирального ножа;

4) на основании расчётов принята высота витка спирального ножа.

## 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 прямооточный роторный рыхлитель<sup>1,2</sup>. Установлено [2], что оптимальная скорость агрегата  $v_a = 0,085$  м/с. Путём логических рассуждений, расчётов, построений в плоскости и пространстве определены геометрические и режимные параметры большого ротора прямооточного роторного рыхлителя диаметром 1 м [3]. Выявлено, что для выемки грунта вблизи оси вращения ротора прямооточного роторного рыхлителя должен быть установлен, соосно с большим ротором, малый ротор с большей угловой скоростью. Малый ротор содержит: наконечник малого ротора со спиральными ножами (рисунок 1), два зубца и два ножа.

Одним из элементов малого ротора является спиральный нож. Хотя теоретические ос-

новы разработки грунта весьма подробно рассмотрены<sup>3, 4, 5, 6, 7</sup> [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22], взаимодействие с грунтом элементов прямооточного роторного рыхлителя почти не изучено. В частности, недостаточно исследовано взаимодействие с грунтом спиральных ножей.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим взаимодействие с грунтом наконечника малого ротора со спиральными ножами. Угловая скорость малого ротора  $\omega_{\text{мр}} = 12,9$  рад/с [23]. Время одного оборота малого ротора  $\tau_{1\text{мр}} = 0,486$  с. За это время точка на витке спирального ножа переместится по ходу агрегата на расстояние около 41 мм, так как поступательная скорость этой точки близка к скорости агрегата. В целом спиральный нож не тормозит агрегат и не ускоряет его. Он, ввинчиваясь в грунт, должен бы лишь уплотнять его в радиальном направлении.

Схема условных сил, воздействующих на наконечник малого ротора со стороны грунта, показана на рисунке 1. Силы назовём условными, так как реальные силы распределены по поверхности конуса и спирального ножа, а они условно приложены к конусу с одной стороны. Для выполнения расчёта приведём в два этапа распределённые силы к сосредоточенным. На первом этапе распределённые по поверхности силы приведём к силам, распределённым по линиям. На наконечнике малого ротора есть часть конуса, не охваченная спиральным ножом. Разделим образующую этой части конуса в пропорции 1:2 и поставим на ней точку  $K$ . Воздействие грунта на эту часть конуса распределим по окружности, проходящей перпендикулярно оси малого ротора через точку  $K$ .

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

<sup>2</sup> 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.

<sup>3</sup> 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.

<sup>4</sup> 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).

<sup>5</sup> 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.

<sup>6</sup> Попов Г. Ф. Рабочие органы фрез: материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. М.: ОНТИ ВИСХОМ, 1970. С. 490–497.

<sup>7</sup> Зыков Б. И. Теория рабочих процессов строительных машин: Учеб. пособие / Б. И. Зыков; М-во образования Рос. Федерации. Ярослав. гос. техн. ун-т. Ярославль: [Яросл. гос. техн. ун-т], 2003 (Тип. ЯГТУ). 114 с.

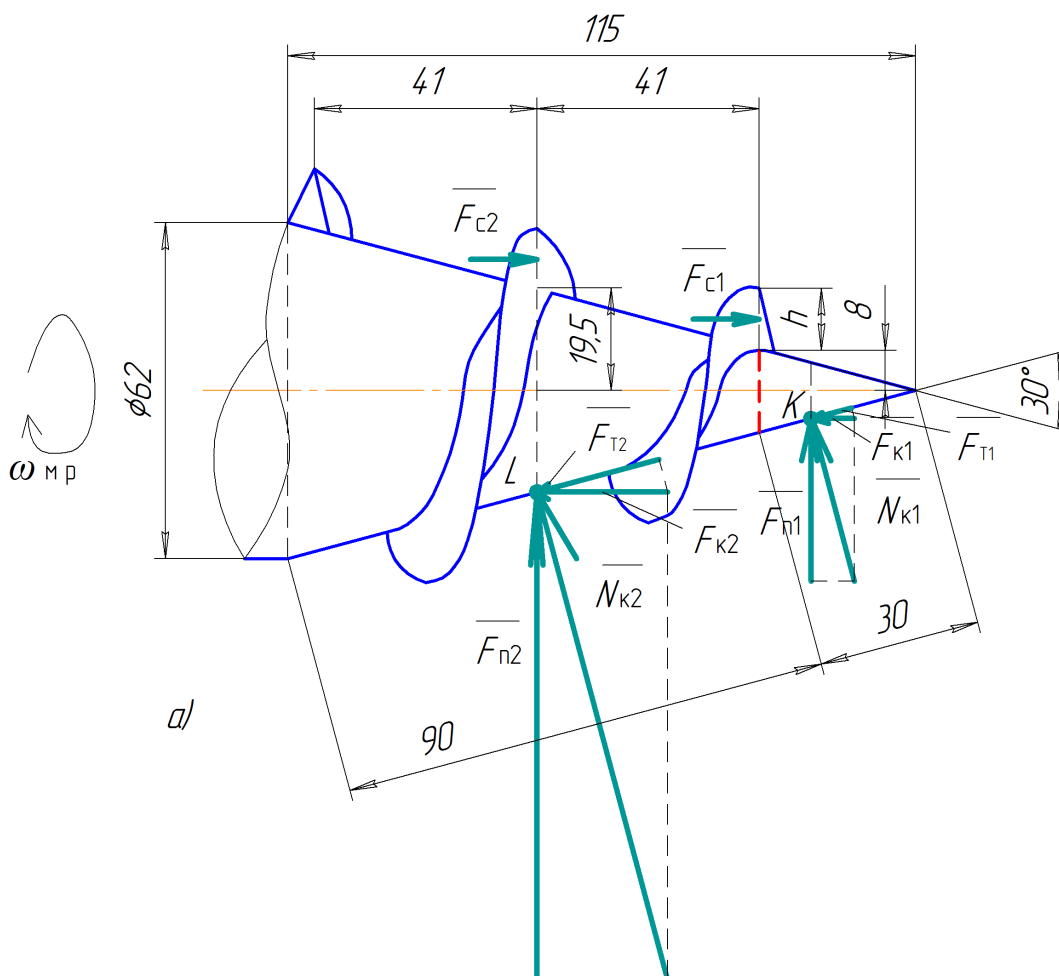


Рисунок 1 – Схема условных сил, действующих на наконечник малого ротора со спиральными ножами  
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Diagram of the conditional forces acting on the tip of a small rotor with spiral blades  
Source: compiled by the authors.

При воздействии этой части конуса на грунт возникает нормальная реакция грунта  $N_{к1}$ . На втором этапе приведём силу, распределённую по окружности к точке, сосредоточив нормальную реакцию грунта  $N_{к1}$  в точке  $K$ .

Учитывая уменьшение поверхности конуса за счёт спирального ножа, разделим образующую части конуса, охваченной спиральным ножом, в пропорции 1:1 и поставим на ней точку  $L$ . Сначала воздействие грунта на эту часть конуса распределим по окружности, проходящей перпендикулярно оси малого ротора через точку  $L$ . Затем приведём силу, распределённую по окружности к точке, сосредоточив нормальную реакцию грунта  $N_{к2}$  в точке  $L$ .

Разложим нормальную реакцию грунта  $N_{к1}$  на составляющие. Если вновь представить поперечную условную составляющую  $F_{н1}$  распределённой нагрузкой, она будет стремиться

сжать конус. Внедрению в грунт конуса противодействует условная сила  $F_{к1}$ , направленная по его оси. Аналогично разложим условную силу  $N_{к2}$ . Получим условные силы  $F_{н2}$  и  $F_{к2}$  воздействия грунта на остальную часть конуса, на которой размещена спираль. Сила  $F_{н2}$  также стремится сжать конус. Сила  $F_{к2}$  противодействует внедрению конуса в грунт. Приложим условные силы  $F_{с1}$  и  $F_{с2}$ , внедряющие конус в грунт, к двум виткам спирального ножа. Чтобы конус внедрялся в грунт, эти силы должны уравнивать сумму сил  $F_{к1}$  и  $F_{к2}$ .

Условные силы воздействия на грунт первого витка спирали  $F_{с1}$  и второго витка спирали (по ходу агрегата)  $F_{с2}$  не равны друг другу по трём причинам. Во-первых, площади воздействия витков спирали на грунт разные. Допустим, высота спирали на всём протяжении спирального ножа одинаковая.

Тогда по мере ввинчивания в грунт длина образующей конуса монотонно увеличивается. Следовательно, будет увеличиваться площадь воздействия спирали на грунт.

Во-вторых, по мере внедрения конуса он уплотняет грунт, поэтому грунт, на который воздействует второй виток спирали, плотнее. Степень уплотнения грунта конусом зависит от многих факторов: тип грунта, его состав, влажность, пористость. Так как плотность грунта по мере внедрения в него конуса увеличивается, сила, противодействующая внедрению конуса в грунт, также будет увеличиваться. С другой стороны, чем плотнее грунт, тем более эффективно воздействие на него спирали спирального ножа. Соотношение увеличения силы, противодействующей внедрению конуса в грунт, и нарастания силы воздействия на грунт спирали спирального ножа неизвестно. Эти соотношения для различных грунтов в различном их состоянии могут быть установлены только экспериментальным путём. Для теоретического расчёта примем допущение: увеличение силы, противодействующей внедрению конуса в грунт, равновелико нарастанию силы воздействия на грунт спирали спирального ножа. Этим исключим из расчёта фактор увеличения плотности грунта по мере внедрения в грунт конуса.

В-третьих, средний угол наклона второго витка спирали меньше, чем первого витка спирали. Для графического определения углов наклона первого и второго витка спирали на рисунке 2, а по горизонтали отложим длины  $AB$  и  $BC$  проекций, образующих на осевую линию спирального ножа равные 41 мм. Из точек  $A$ ,  $B$  и  $C$  вертикально отложим отрезки  $AD$ ,  $BE$  и  $CF$ , равные длинам окружностей, проведённым перпендикулярно оси малого ротора через основания спирали в начале и конце её витков. Например, радиус основания первого витка спирали варьируется от 8 мм вначале до 19,5 мм [23]. Радиус основания второго витка спирали изменяется от 19,5 до 31 мм. Длина окружности  $CF = 2\pi \cdot 8 \approx 50$  мм,  $BE = 2\pi \cdot 19,5 \approx 122,5$  мм,  $AD = 2\pi \cdot 31 \approx 195$  мм.

Соединим точки  $D$ ,  $E$  и  $F$ . Из точек  $E$  и  $F$  проведём горизонтали и получим точки  $K$  и  $L$ . Соединив отрезками точки  $B$  и  $K$ ,  $C$  и  $L$ , получим углы наклона основания спирали в начале первого и второго витка. Соединив отрезками точки  $B$  и  $D$ ,  $C$  и  $E$ , получим углы наклона основания спирали в конце первого и второго витка.

Из построения видно, что угол наклона основания спирали в начале первого вит-

ка  $39,35^\circ$  больше угла трения стали о грунт  $\varphi_{ст} \approx 25^\circ$ . Поэтому начальная часть (по ходу агрегата) основания первого витка спирального ножа при работе будет не только тормозиться о грунт, но и нерационально смещать его. Будет нецелесообразное расходование энергии на перемещение начальной части основания первого витка спирального ножа. Чтобы этого не произошло, следовало бы укоротить первый виток спирального ножа, удалив начальную часть.

Отложим от вертикали из точки  $C$  угол  $25^\circ$ . Проведём под этим углом отрезок  $CM$ , из точки  $M$  – горизонталь  $MN$ , а из точки  $N$  – вертикаль  $NP$ . Получим расстояние  $BP$ , равное 19,5 мм по оси малого ротора, на которое должен был бы распространиться первый виток спирального ножа вперёд от начала второго витка спирального ножа, если бы задняя поверхность спирального ножа была перпендикулярна оси малого ротора (рисунок 2, б).

Однако такой профиль спирального ножа нерационален, так как при ввинчивании спирального ножа в грунт часть усилия от его задней поверхности будет через грунт распространяться на конус. Таким образом, наконечник малого ротора будет тормозить своё поступательное перемещение в грунте. Поэтому целесообразнее вариант исполнения спирального ножа, при котором задняя поверхность спирального ножа перпендикулярна образующей конуса (рисунок 2, в). Угол заточки спирального ножа должен также быть меньше угла трения стали о грунт. Примем угол заточки спирального ножа  $20^\circ$ .

Если задняя поверхность спирального ножа перпендикулярна образующей конуса, во-первых, произойдёт небольшая трансформация угла наклона первой и второй спирали в сторону его уменьшения. Во-вторых, по мере удаления от основания витка спирального ножа также происходит трансформация угла наклона спирали в сторону его уменьшения. В-третьих, чем позднее (по ходу агрегата) спираль будет врезаться в грунт, тем больший вращающий момент необходим для преодоления сопротивления грунта внедрению торца спирального ножа, поскольку будет увеличиваться плечо силы, необходимой для внедрения торца спирального ножа. При этом увеличение момента, необходимого для преодоления сопротивления грунта внедрению торца спирального ножа, может быть большим, чем увеличение момента, вызванное нецелесообразным расходованием энергии на перемещение начальной части первого витка спирального ножа.

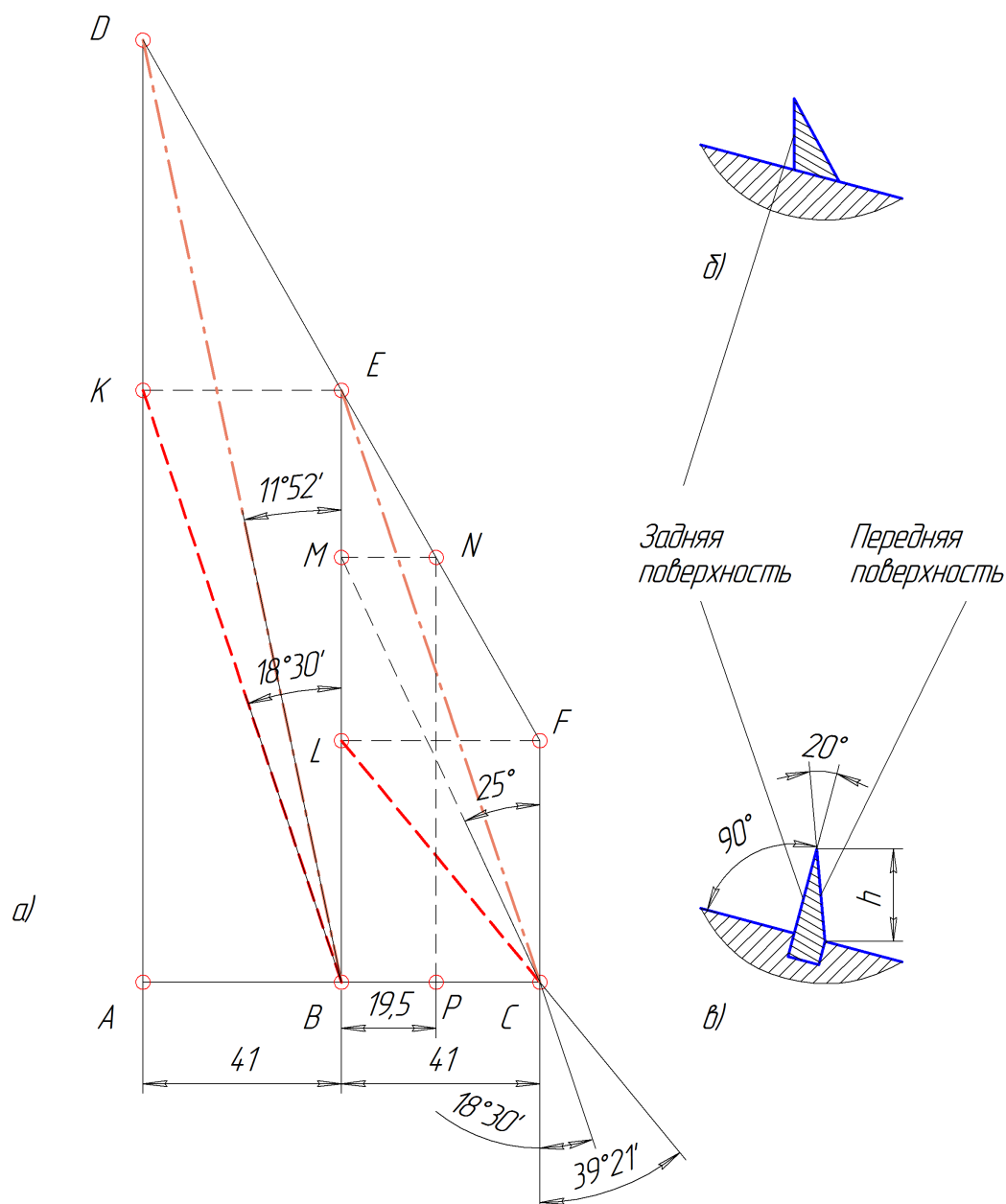


Рисунок 2 – К определению угла наклона первого и второго витка спирали:  
 а – построения; б – задняя поверхность спирального ножа перпендикулярна оси малого ротора;  
 в – задняя поверхность спирального ножа перпендикулярна образующей конуса  
 Источник: составлено автором.

Figure 2 – To determine the angle of inclination of the first and second turns of the spiral: a - construction;  
 b - the rear surface of the spiral blade is perpendicular to the axis of the small rotor;  
 c - the back surface of the spiral blade is perpendicular to the forming cone  
 Source: compiled by the authors.

В-четвёртых, увеличится часть конуса, не охваченная спиральным ножом, создающая лишь сопротивление поступательному перемещению агрегата. Исходя из этих предпосылок, оставим первый виток спирального ножа без изменений.

Допустим, соотношение сил, действующих на часть конуса со спиралью, к части ко-

нуса без спирали равно отношению длин образующих этих частей конуса, то есть  $\frac{30}{90} = \frac{1}{3}$ , или  $F_{к2} = 3F_{к1}$ . Допустим также, что спиральный нож не тормозит агрегат и не ускоряет его, то есть сумму сил, противодействующих внедрению конуса в грунт, уравновешивают силы, внедряющие конус в грунт:

$$F_{c1} + F_{c2} = F_{k1} + F_{k2} = 4F_{k1}. \quad (1)$$

Условная сила  $4F_{k1}$ , противодействующая внедрению конуса в грунт, обусловлена его трением о грунт, то есть условными силами  $F_{\tau1}$  и  $F_{\tau2}$ . Так как угол при вершине конуса  $30^\circ$ , то

$$4F_{k1} = \frac{4F_{\tau1}}{\cos 15^\circ}.$$

Условная сила трения конуса

$$4F_{\tau1} = f_{c-\Gamma}(N_{k1} + N_{k2}),$$

где коэффициент трения грунта о сталь  $f_{c-\Gamma} \approx 0,5$ .

Сумма условных нормальных реакций конуса на воздействие грунта равна произведению удельного сопротивления грунта  $p$  на площадь поверхности конуса  $S_k$  и на коэффициент  $k$ , учитывающий увеличение удельного сопротивления грунта по мере его уплотнения конусом:

$$N_{k1} + N_{k2} = kpS_k. \quad (2)$$

Площадь поверхности конуса  $S_k = \pi r l$ , поэтому

$$N_{k1} + N_{k2} = kp\pi r l; \quad (3)$$

$$4F_{\tau1} = f_{c-\Gamma}kp\pi r l;$$

$$4F_{k1} = \frac{f_{c-\Gamma}kp\pi r l}{\cos 15^\circ}. \quad (4)$$

Условная сила  $F_{c1}$ , внедряющая конус в грунт, равна произведению удельного сопротивления грунта  $p$  на площадь поверхности первого витка спирали  $S_{1c}$ , на коэффициент  $k$ , учитывающий увеличение удельного сопротивления грунта по мере его уплотнения конусом и на косинус угла наклона спирали:

$$F_{c1} = kpS_{1c} \cos \beta_1. \quad (5)$$

Аналогично

$$F_{c2} = kpS_{2c} \cos \beta_2. \quad (6)$$

Подставив в формулу (1), получим

$$kp(S_{1c} \cos \beta_1 + S_{2c} \cos \beta_2) = \frac{f_{c-\Gamma}kp\pi r l}{\cos 15^\circ}, \quad (7)$$

$$S_{1c} \cos \beta_1 + S_{2c} \cos \beta_2 = \frac{f_{c-\Gamma}\pi r l}{\cos 15^\circ}.$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Радиус основания конуса [30]  $r=31$  мм, длина образующей  $l=120$  мм. Отсюда (7)

$$S_{1c} \cos \beta_1 + S_{2c} \cos \beta_2 = \frac{0,5 \cdot 3,14 \cdot 31 \cdot 120}{0,966} = 6046 \text{ мм}^2.$$

Из рисунка 2, в видно, что площадь средней поверхности витка спирального ножа приблизительно равна произведению высоты витка  $h$  на длину его средней линии, соответственно:

$$S_{1c} = hl_{c1}; S_{2c} = hl_{c2}.$$

Средняя линия – это такая спираль, которая проходит на расстоянии  $h/2$  от основания витка спирального ножа. Длина средней линии витка спирального ножа зависит от геометрических параметров спирального ножа. Спроецируем несколько спиралей на поперечно-вертикальную плоскость (рисунок 3) с целью приблизительного определения графическим путём зависимостей длин средних линий от высоты витка спирального ножа. Примем высоту  $h$  витка спирального ножа 0, 5, 10, 15 мм. На рисунке 3 вначале проведём окружности штриховыми линиями, соответствующие началу и окончанию витков спиралей. Затем разделим окружности на 8 частей, проведя радиальные линии из центров окружностей под углом  $45^\circ$  друг от друга. Вычислим шаг увеличения диаметра. Для этого вычтем из значения диаметра окружности, на которой виток спирали заканчивается, значение диаметра окружности, на которой виток спирали начинается, и разность разделим на 8. Например:  $(39-16):8=2,875$  (см. рисунок 3, а). Добавляя к предыдущему диаметру шаг увеличения диаметра, вычертим тонкими линиями концентрические окружности.

На пересечении окружностей и соответствующих им радиальных линий поставим точки и соединим эти точки плавной кривой. Получим проекции спиралей на поперечно-вертикальную плоскость. Из рисунка 3, а длина первого витка спирали  $l_1=86,8$  мм, второго витка –  $l_2=158,3$  мм. Из рисунка 3, б длина первого витка спирали  $l_1=117,8$  мм, второго витка –  $l_2=189,5$  мм. Из рисунка 3, в длина первого витка спирали  $l_1=149$  мм, второго витка –  $l_2=220,8$  мм. Из рисунка 3, г длина первого витка спирали  $l_1=180,2$  мм, второго витка –  $l_2=252$  мм.

Зависимости длин спирали от высоты витка спирального ножа показаны на рисунках 4 и 5. Итак, зависимость длины средней линии  $l_{c1}$  первого витка спирали от высоты  $h$  спирального ножа:

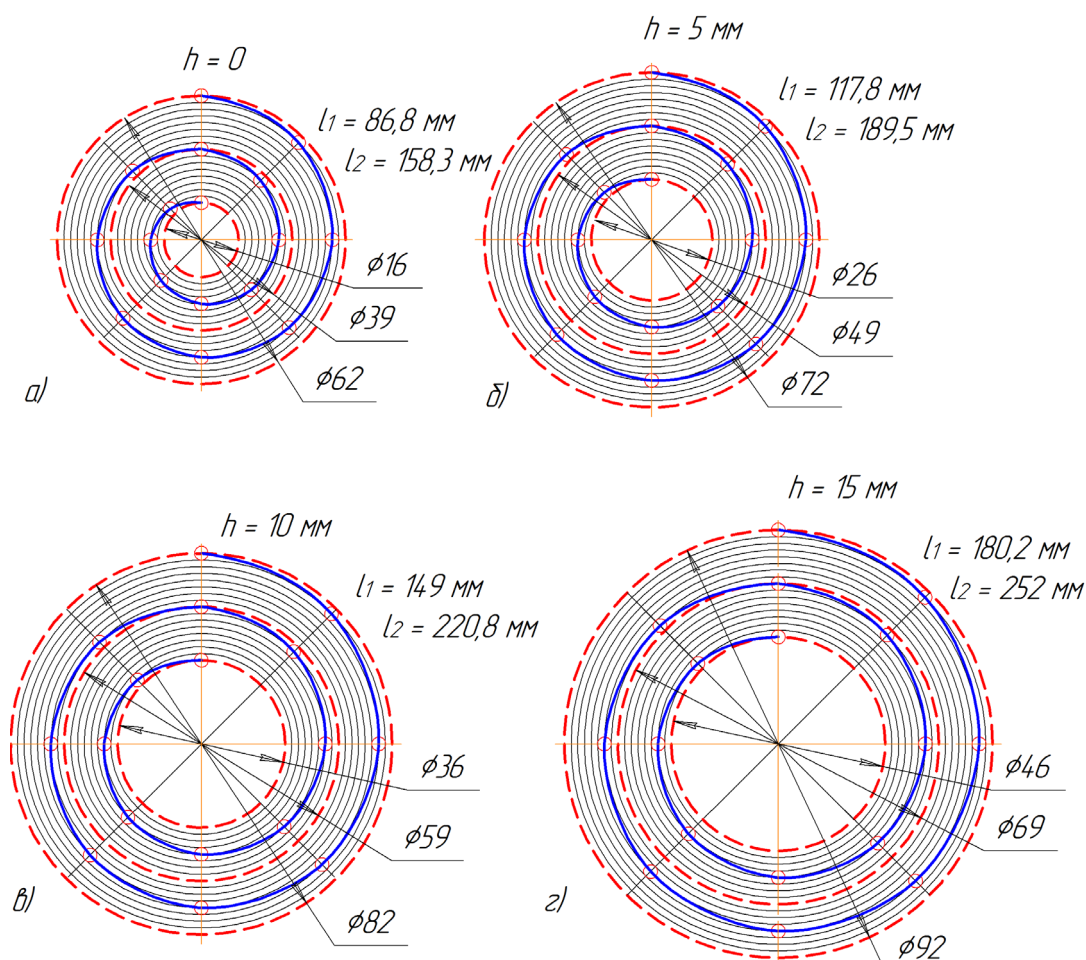


Рисунок 3 – К определению длин средних линий витков спирального ножа:  
а, б, в, г – высота витка спирального ножа, соответственно, 0, 5, 10, 15 мм  
Источник: составлено автором.

Figure 3 – To determine the lengths of the middle lines of the turns of the spiral blade:  
a, b, c, d - the height of the turn of the spiral blade, respectively, 0, 5, 10, 15 mm  
Source: compiled by the authors.

$$l_{c1} = 31,14h + 55,6, \quad (8)$$

второго витка

$$l_{c2} = 31,24h + 127. \quad (9)$$

Угол наклона основания первого витка спирального ножа изменяется приблизительно от  $39,5^\circ$  в начале до  $18,5^\circ$  в конце первого витка

(см. рисунок 2). Угол наклона основания второго витка спирального ножа изменяется приблизительно от  $18,5^\circ$  в начале до  $12^\circ$  в конце второго витка.

С целью упрощения расчёта примем средние значения углов наклона оснований витков спирали: первой –  $\beta_1 = 30^\circ$ , второй –  $\beta_2 = 15,75^\circ$ , соответственно,  $\cos \beta_1 = 0,866$ ,  $\cos \beta_2 = 0,962$ .

Формула (7) примет вид:

$$0,866h(31,14h + 55,6) + 0,962h(31,24h + 127) = 6046 \text{ мм}^2;$$

$$26,97h^2 + 48,15h + 30,05h^2 + 122,17h = 6046 \text{ мм}^2;$$

$$57,02h^2 + 170,32h - 6046 = 0;$$

$$h = \frac{-170,32 \pm \sqrt{170,32^2 + 4 \cdot 57,02 \cdot 6046}}{2 \cdot 57,02} = \frac{-170,32 \pm 1186,58}{114,04}.$$

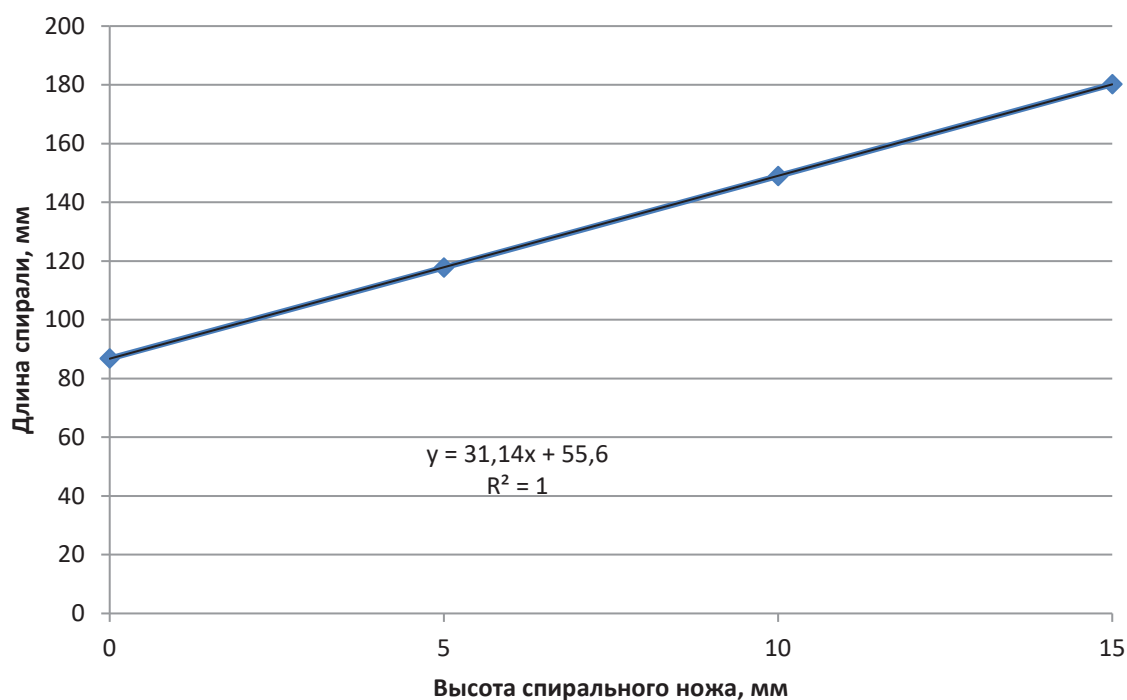


Рисунок 4 – Зависимость длины первого витка спирали от высоты спирального ножа  
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Dependence of the length of the first turn of the spiral on the height of the spiral blade  
Source: compiled by the authors.

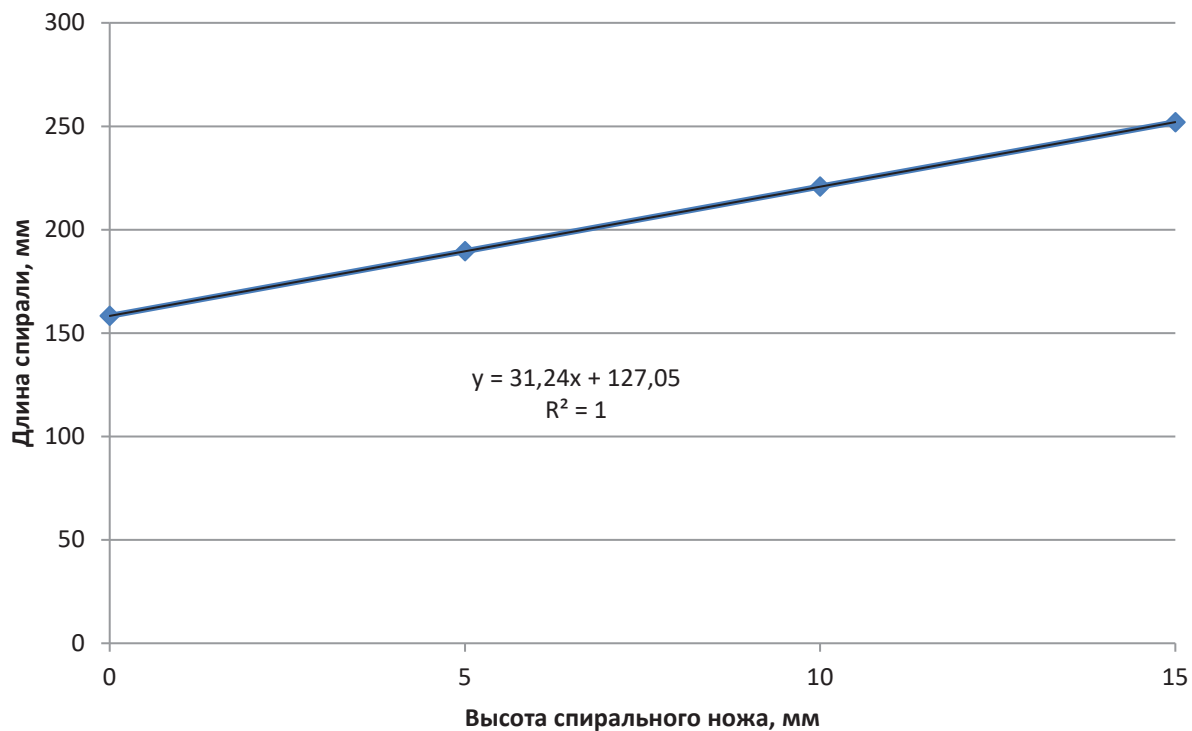


Рисунок 5 – Зависимость длины второго витка спирали от высоты спирального ножа  
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Dependence of the length of the second turn of the spiral on the height of the spiral blade  
Source: compiled by the authors.

Первый корень  $h = \frac{-170,32+1186,58}{114,04} = 8,9$  мм. Второй корень отрицательный, поэтому не имеет смысла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построением развёртки определены углы наклона первого и второго витка спирали. Путём построения проекций на поперечно-вертикальную плоскость определены длины средних линий витков спирального ножа. На основании расчётов, с учётом изнашивания в процессе эксплуатации и искажения проекции спирали на поперечно-вертикальную плоскость, примем высоту витка спирального ножа  $h=10$  мм.

## 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*. Сборник, выпуск 41/1. Москва. 2019. 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., Kurzner 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. Чмиль 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. 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.

22. 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.

23. 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>

## 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. 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)

5. Karnauhov A. I., Orlovskij S. N. Opredelenie zatrat udel'noj jenergii na process rezanija lesnyh pochv torcevyimi 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. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezanija pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezoz [Determine critical cutting depth when combined cutting soils gidrofrezoz]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 5: 47-49. (In Russ)

7. Kirillov F. F. Determinirovannaja matematicheskaja model' vremennogo raspredelenija tjavovogo 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)

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. 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)

10. Ryabets N., Kurzchner 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 upravljajemyh nozhevyh sistem zemlerojno-transportnyh 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 uslovijah svobodnogo rezanija [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-akkumulativnyj 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.)

18. Kabashev R. A., Turgumbaev S. D. Jeksperimental'nye issledovanija processa kopanija 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 soprotivlenija 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 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.)

21. Syromjatnikov Ju. N., Hramov I. S., Vojnash S. A. Gibkij jelement v sostave rabochih organov rotnoj 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.)

22. Parhomenko G. G., Parhomenko S. G. Silovoj analiz mehanizmov peremeshhenija 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.)

23. 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>

## 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.