

Научная статья
УДК 625.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-12-25>
EDN: MBWUSI



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ГРУНТОМ ЗУБЦОВ И НОЖЕЙ МАЛОГО РОТОРА И РАСЧЁТ ОБЩЕЙ МОЩНОСТИ НА ПРИВОД МАЛОГО РОТОРА

В.А. Николаев

Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия
✉ Nikola ev53@inbox.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема быстрого и качественного строительства дорог, когда объекты хозяйствования и населённые пункты пространственно разобщены и расположены на значительном расстоянии друг от друга, не может быть решена без применения комплекса агрегатов непрерывного действия. Важным элементом агрегата непрерывного действия, формирующего кювет, и агрегата для проходки туннелей является прямоточный роторный рыхлитель. Существующие теоретические исследования не достаточны для расчёта взаимодействия с грунтом элементов прямоточного роторного рыхлителя. Отсутствие теоретического обоснования параметров прямоточных роторных рыхлителей сдерживает их применение. Поэтому существует необходимость теоретических исследований для выявления геометрических, кинематических, динамических и энергетических параметров элементов конструкции.

Методика исследования. Разработаны методики расчётов необходимой мощности: на привод зубцов, для отделения ножами пласта от массива грунта и его разделения на фрагменты, для преодоления силы инерции набегающего грунта на два ножа малого ротора, для ускорения грунта в сторону большого ротора, для осуществления перемещения грунта в сторону большого ротора, для преодоления силы трения грунта о переднюю поверхность ножей. Общая мощность, необходимая для привода малого ротора, соответствует сумме мощностей: на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт, на привод зубцов и на привод ножей.

Результаты. На основе разработанных методик произведены расчёты параметров. Из плоских и пространственной модели сил взаимодействия с грунтом элементов малого ротора выявлены их равнодействующие, их составляющие, нормальные силы. Вычислена сила трения грунта о переднюю поверхность ножа. Рассчитана общая мощность на привод малого ротора и объёмная энергия на внедрение малого ротора в грунт.

Заключение. Затраты энергии на привод ножей малого ротора включают: энергию на отделение пласта и разделение его на фрагменты, энергию на преодоление напора грунта на переднюю поверхность ножа, энергию на ускорение грунта, энергию на перемещение грунта, энергию на преодоление силы трения грунта о передние поверхности ножей. Общие затраты энергии на привод малого ротора содержат энергию на внедрение в грунт конуса со спиральным ножом, зубцов и ножей малого ротора. В результате расчётов мощность для привода зубцов малого ротора 735 Вт, общая мощность, необходимая для привода малого ротора 2,2 кВт. Объёмная энергия для внедрения малого ротора в грунт 33,1 кДж/куб. м.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, автодороги, агрегаты непрерывного действия, прямоточный роторный рыхлитель, малый ротор, зубцы, ножи

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.09.2023; одобрена после рецензирования 29.11.2023; принята к публикации 20.02.2024.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Николаев В.А. Взаимодействие с грунтом зубцов и ножей малого ротора и расчёт общей мощности на привод малого ротора // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 1. С. 12-25. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-12-25>

© Николаев В.А., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-12-25>

EDN: MBWUSI

MINOR ROTOR TINES AND KNIVES SOIL INTERACTION TOTAL POWER CALCULATION FOR MINOR ROTOR DRIVE

Vladimir A. Nikolaiev

Yaroslavl Technical University,

Yaroslavl, Russia

✉ Nikolaiev53@inbox.ru

ABSTRACT

Introduction. The problem of fast and high-quality road construction, when economic facilities and settlements are spatially separated, located at a considerable distance from each other, cannot be solved without the use of a complex of continuous units. An important element of the continuous unit forming the ditch and the unit for tunneling is the direct-flow rotary ripper. Current theoretical studies are not sufficient to calculate the interaction with the soil of the elements of a direct-flow rotary ripper. The lack of theoretical justification for the parameters of direct-flow rotary rippers hinders their use. Therefore, there is a need for theoretical research to identify the geometric, kinematic, dynamic and energy parameters of structural elements.

The method of research. Methods for calculating the required power to drive the teeth, to separate the seam from the soil mass with knives and divide it into fragments, to overcome the inertia force of the incoming soil on two small rotor knives, to accelerate the soil towards the large rotor, to move the soil towards the large rotor, to overcome the friction force of the soil on the front surface of the knives have been developed. The total power required to drive the small rotor corresponds to the sum of the powers: for the introduction of a cone with a spiral knife into the ground, for the drive of the teeth and for the drive of the knives.

Results. On the basis of the developed methods, the parameters were calculated. From the flat and spatial model of the forces of interaction with the ground of the elements of the small rotor, their resultant, their components, and normal forces are revealed. The friction force of the soil on the front surface of the knife is calculated. The total power for the drive of the small rotor and the volumetric energy for the introduction of the small rotor into the ground are calculated.

Conclusion. The energy costs for driving small rotor knives include: energy for separating the reservoir and dividing it into fragments, energy for overcoming the pressure of the soil on the front surface of the knife, energy for accelerating the soil, energy for moving the soil, energy for overcoming the friction force of the soil on the front surfaces of the knives. The total energy cost of the small rotor drive includes the energy required to introduce the spiral knife cone, teeth and knives of the small rotor into the ground. As a result of the calculations, the power to drive the teeth of the small rotor is 735 W, the total power required to drive the small rotor is 2.2 kW. The volumetric energy for the introduction of a small rotor into the ground is 33.1 kJ / cubic meter.

KEYWORDS: construction, roads, continuous units, direct-flow rotary ripper, minor rotor, tine, knives

CONFLICT OF INTEREST: The author declare no conflict of interest.

The article was submitted 20.09.2023; approved after reviewing 29.11.2023; accepted for publication 20.02.2024.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Nikolaiev V.A. Minor rotor tines and knives soil interaction. Total power calculation for minor rotor drive. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2024; 21 (1): 12-25. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-12-25>

© Nikolaiev V.A., 2024



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1) разработаны методики расчётов мощностей: на привод зубцов, для отделения ножами пласта от массива грунта и его разделения на фрагменты, для преодоления силы инерции набегающего грунта на два ножа малого ротора, для ускорения грунта в сторону большого ротора, для осуществления перемещения грунта в сторону большого ротора, для преодоления силы трения грунта о переднюю поверхность ножей;

2) разработана методика построения пространственной модели сил взаимодействия с грунтом ножа малого ротора;

3) из плоских и пространственной модели сил взаимодействия с грунтом элементов малого ротора выявлены их равнодействующие, их составляющие, нормальные силы;

4) рассчитана общая мощность на привод малого ротора и объёмная энергия на его внедрение в грунт.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема быстрого и качественного строительства дорог, когда объекты хозяйствования и населённые пункты пространственно разобщены и расположены на значительном расстоянии друг от друга, не может быть решена без применения комплекса агрегатов непрерывного действия [1]. Важным элементом агрегата непрерывного действия, формирующего кювет, и агрегата для проходки туннелей является прямооточный роторный рыхлитель^{1, 2} [2]. Установлено [3], что прямооточный роторный рыхлитель должен иметь большой ротор и малый ротор, установленный соосно с большим ротором. Рациональный диаметр большого ротора прямооточного роторного рыхлителя 1 м.

К сожалению, существующие теоретические исследования^{3, 4, 5, 6, 7} [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20] не достаточны для расчёта взаимодействия с грунтом элементов прямооточного роторного рыхлителя. Отсутствие теоретического обоснования параметров прямооточных роторных рыхлителей сдерживает их применение. Поэтому существует необходимость теоретических исследований для выявления геометрических, кинематических, динамических и энергетических параметров элементов конструкции. Ранее [21, 22] были определены многие параметры элементов малого ротора. Целью предлагаемого теоретического исследования является уточнение конструктивных и режимных параметров зубцов и ножей малого ротора прямооточного роторного рыхлителя и выявление общей мощности на привод малого ротора.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

На диске малого ротора имеются два зубца для разрыхления грунта перед диском и подачи его к ножам, внутрь диска [21]. Поскольку подача на нож $s_n = 20$ мм, высота зубцов должна быть больше подачи на нож. Из построения получилась высота зубцов 35 мм. Расстояние от оси малого ротора до основания зубца равно внутреннему радиусу диска $r_{o_3} = 165$ мм. Расстояние от оси малого ротора до вершины, то есть режущей кромки зубца, равно наружному радиусу диска $r_{в_3} = 180$ мм. Установлено [4], что оптимальная скорость агрегата с прямооточным роторным рыхлителем $v_a = 0,85$ м/с. Угловая скорость малого ротора $\omega_{мр} = 12,9 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ [21]. Тогда окружная скорость вершины зубца, то есть скорость резания грунта зубцом,

$$v_{\text{окр в з}} = \omega_{\text{мр}} r_{\text{в з}}; v_{\text{окр в з}} = 12,9 \cdot 0,18 = 2,3 \text{ м/с.}$$

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. Ярославль: Изд. ЯГТУ, 2003. 114 с.

⁴ 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.

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

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

⁷ Исследование рабочих органов землеройных машин непрерывного действия. Сборник под ред. З. Е. Гарбузова. М.: 1966. 88 с.

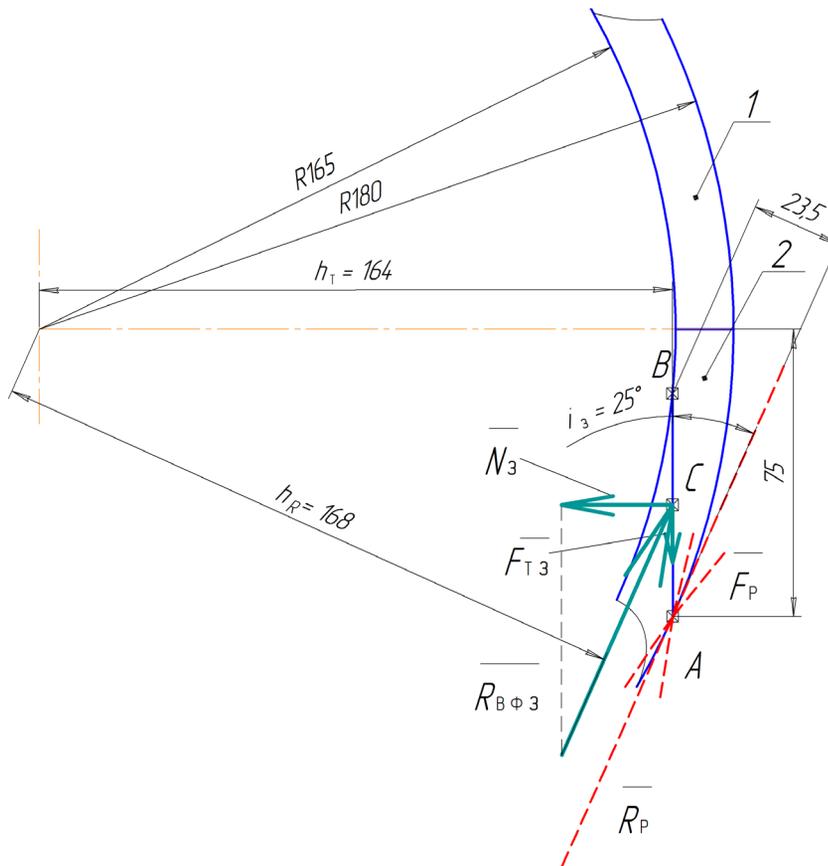


Рисунок 1 – Схема сил взаимодействия зубца с грунтом в проекции на поперечно-вертикальную плоскость
 Источник: составлено автором.

Figure 1 – Diagram of the forces of interaction of the tine with the ground in the projection on the transverse-vertical plane
 Source: compiled by the author.

Приложим к зубцу проекцию на поперечно-вертикальную плоскость силы F_p резания грунта. Угол наклона этой силы δ_3 к поперечно-вертикальной плоскости пропорционален отношению подачи на нож к половине длины окружности, соответствующей наружному радиусу диска

$$\delta_3 = \arctg \frac{s_H}{\pi r_{в.з}}; \delta_3 = \arctg \frac{20}{3,14 \cdot 180} = \arctg 0,035 \approx 2^\circ.$$

Так как угол наклона силы резания грунта к поперечно-вертикальной плоскости мал, проекцию на поперечно-вертикальную плоскость силы F_p можно условно считать равной силе F_p , а проекции всех сил взаимодействия зубца с грунтом на поперечно-вертикальную плоскость также равным этим силам. Трансформацией угла заострения лезвия зубца также можно пренебречь. Поэтому рассмотрим силы взаимодействия зубца с грунтом в проекции на поперечно-вертикальную плоскость (рисунок 1).

Если бы резание грунта зубцом можно было рассматривать как резание лезвием, то силу резания F_p следовало бы приложить к лезвию. Тогда противодействовала бы равная ей по величине реакция грунта R_p . Так как зубец осуществляет зажатое резание, а угол i_3 при вершине зубца равен углу трения стали о грунт, то резание грунта зубцом следует рассматривать как резание пуансоном. Ширина срезаемого зубцом слоя грунта b_p , толщина срезаемого слоя грунта, срезаемого зубцом, равная подаче на нож s_H [21]. Реакция грунта на воздействие внутренней фаски зубца

$$R_{в.ф.з} = p b_p s_H, \tag{1}$$

где p – удельное сопротивление грунта.

Разделим расстояние АВ пополам (см. рисунок 1), приложим к точке С силу $R_{в.ф.з}$ и, спроецировав её на нормаль к передней поверхности, получим нормальную силу N_3 , с которой зуб воздействует на грунт. Нормаль-

ная сила N_3 стремится сдформировать диск малого ротора в радиальном направлении. Поэтому диск малого ротора должен иметь достаточный запас прочности в радиальном направлении. Сила трения грунта о внутреннюю поверхность зубца

$$F_{\tau 3} = f_{c-r} N_{зуб}. \quad (2)$$

Трением грунта о наружную поверхность зубца пренебрегаем. Обозначим плечи силы трения h_{τ} и реакции грунта на воздействие внутренней фаски зубца h_R . Вращающий момент, необходимый для резания грунта двумя зубцами и преодоления сил трения внутренних поверхностей зубцов о грунт,

$$M_3 = 2(R_{в\phi 3} h_R + F_{\tau 3} h_{\tau}). \quad (3)$$

Так как угловая скорость малого ротора $\omega_{мр}$, мощность, затрачиваемая на привод зубцов,

$$N_3 = M_3 \omega_{мр}. \quad (4)$$

Ножи малого ротора [21] режут как неразрыхлённый грунт вследствие поступательно-го перемещения агрегата, так и грунт после воздействия спирального ножа, зубцов. Спиральный нож и зубцы грунт как разрыхляют, так и уплотняют. Степень разрыхления грунта и его уплотнения зависит от многих факторов, поэтому теоретически трудно прогнозируема. Вследствие этого допустим, что спиральный нож и зубцы не оказывают никакого влияния на резание грунта ножами малого ротора. Поэтому рассмотрим резание грунта этими ножами в чистом виде, то есть без учёта грунта, поступающего со спирального ножа и двух зубцов. Грунт, поступающий со спирального ножа и двух зубцов, учтём лишь при расчёте его перемещения ножами от малого ротора внутрь большого ротора.

Ножи малого ротора совершают свободное резание грунта лезвием со скольжением⁸. Это обусловлено, во-первых, тем, что срезаемый ножами малого ротора слой грунта предвательно отрезан с внутренней стороны спи-

ральным ножом [22], а с наружной стороны – зубцами диска. Во-вторых, отсутствует воздействие грунта на заднюю поверхность ножа, так как передняя поверхность повернута относительно поперечно-вертикальной плоскости, передний угол $\alpha_{\tau} = 25^{\circ}$ ⁹, угол отклонения лезвия в плоскости резания $\beta = 50^{\circ}$, поэтому угол заострения лезвия трансформируется: $i_{\tau p} = 13^{\circ}$ ¹⁰. Трансформация угла заострения лезвия позволила уменьшить задний угол до $\varepsilon_{\tau мр} = 12^{\circ}$. Рассмотрим отдельно каждую составляющую затрат энергии на разрыхление грунта ножом.

Сила, необходимая для отделения пласта от массива грунта

Линия сочленения ножа с поверхностью наконечника малого ротора представляет пространственную кривую [22]. Начертим развёртку этой линии на плоскость (рисунок 2, а), перпендикулярную лезвию ножа в точке сочленения ножа с поверхностью наконечника малого ротора. Из развёртки получим размеры сечения ножа у поверхности наконечника малого ротора. Если бы толщина ножа была меньше толщины срезаемого слоя грунта, то необходимо было бы к ножу присоединить откылки для транспортировки срезанного грунта внутрь большого ротора. Наибольшая толщина ножа, с учётом трансформации угла заострения лезвия, $b_{н} = 24$ мм¹¹, что превышает толщину срезаемого слоя грунта $s_{н} = 20$ мм [22].

Так как толщина ножа с учётом трансформации угла заострения лезвия больше толщины срезаемого слоя грунта, весь срезанный грунт нож направит внутрь большого ротора, даже с учётом грунта, поступающего со спирального ножа и зубцов. Задняя поверхность ножа с грунтом практически не взаимодействует. Передняя поверхность ножа отодвигает слой грунта внутрь большого ротора.

Если бы передний угол был больше угла трения грунта по стали $\varphi_{c-r} \approx 26^{\circ}$, то при резании произошёл бы не только отрыв пласта от массива перед лезвием, но и сдвиг пласта грунта. Направление условной плоскости сдвига было бы отклонено вперёд от перпендикуляра к передней поверхности ножа на угол трения грунта по грунту $\varphi_{r-r} \approx 45^{\circ}$.

⁸ Николаев В.А. Резание грунта активными рабочими органами. Теория и расчёт: учебное пособие. Ярославль. Изд-во: ЯГТУ, 2023. 560 с.

⁹ Там же.

¹⁰ Там же.

¹¹ Николаев В.А. Резание грунта активными рабочими органами. Теория и расчёт: учебное пособие. Ярославль. Изд-во: ЯГТУ, 2023. 560 с.

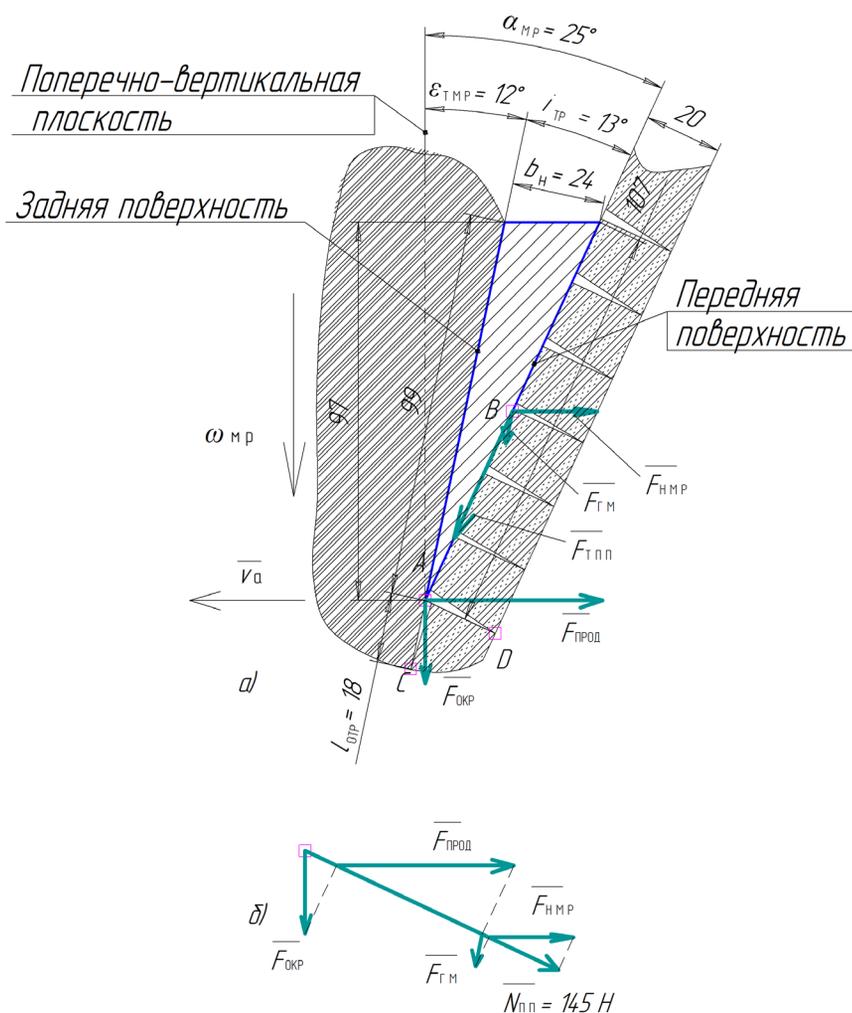


Рисунок 2 – Схемы: а – развёртки линий сочленения задней, передней и тыльной поверхности ножа малого ротора с поверхностью наконечника малого ротора; б – сложения сил для определения нормальной силы
 Источник: составлено автором.

Figure 2 – Diagrams: a – scans of the lines of articulation of the rear, front and back surfaces of the minor rotor knife with the surface of the tip of the minor rotor; b – addition of forces to determine the normal force
 Source: compiled by the author.

Экспериментально установлено, что сдвиг отрезаемого пласта состоит из периодических микросдвигов на среднем пути 18 мм¹². Перед каждым микросдвигом грунта происходит накопление в нём упругого потенциала. Поэтому следовало бы учитывать затраты энергии на упругую деформацию грунта, его объёмное сжатие, то есть сделать поправку на коэффициент микросдвигов $k_{мсд}$ [1]. Его физический смысл заключён в соотношении среднего усилия воздействия ножа на грунт и усилия в мо-

мент сдвига. В фазе уплотнения наблюдается линейная зависимость. Отсюда энергия, необходимая для накопления упругого потенциала в грунте перед сдвигом, приблизительно равна половине энергии, необходимой для его сдвига¹³: $u_{уп} = \frac{u_{сд}}{2}$. Коэффициент $k_{мсд}$ следует уточнять экспериментальным путём и при увеличении скорости агрегата корректировать в сторону увеличения. В первом приближении обычно его принимают $k_{мсд} = 1,5$. Так как передний угол не превышает угол трения грунта по

¹² Николаев В.А. Резание грунта активными рабочими органами. Теория и расчёт: учебное пособие. Ярославль. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2023. 560 с.

¹³ Там же.

стали $\varphi_{с-г} \approx 26^\circ$, то при резании произойдёт отрыв пласта от массива перед лезвием и разделение оторванного пласта грунта на фрагменты в момент его изгиба (см. рисунок 2, а).

Длина рабочей части лезвия ножа l_l [21]. Площадь $S_{отр}$ отрыва пласта от массива перед лезвием определим как произведение развёртки длины рабочей части лезвия ножа l_l на длину $l_{отр}$ щели отрыва АС:

$$S_{отр} = l_{отр} l_l. \quad (5)$$

При отрыве пласта от массива грунт испытывает деформацию растяжения. Предел прочности грунта на растяжение зависит от многих факторов и изменяется в широких пределах. Примем для свободного резания со скольжением σ_p^B . Сила, преодолеваемая воздействием передней кромки лезвия ножа, необходимая для преодоления сцепления грунта,

$$F_{сц} = \sigma_p^B S_{отр}. \quad (6)$$

Мощность, необходимая для отделения пласта и разделение его на фрагменты

Разделение отделённого ножом от массива пласта грунта на фрагменты происходит не по плоскости, а по поликриволинейной поверхности с трещинами-ответвлениями. Чем толще отделяемый пласт, тем больше может быть трещин-ответвлений от поликриволинейной поверхности. Увеличение площади поликриволинейной поверхности в сравнении с плоскостью и наличие трещин-ответвлений в отделяемом пласте грунта можно установить только экспериментальным путём. Если грунт связный, высокой влажности, то он не разделяется на фрагменты, а сходит с ножа лентой. Однако для изгиба пласта воздействием на него передней поверхности ножа неизбежно нужны затраты энергии. Если грунт высокой влажности, то затраты энергии на изгиб пласта меньше, чем аналогичные затраты энергии при разработке грунта невысокой влажности. Но при разработке грунта высокой влажности проявляется его липкость. Если грунт налипает на нож, заменяется трение скольжения грунта по стали трением скольжения грунта по грунту. Возрастание затрат энергии на увеличение силы трения не только компенсирует экономии энергии на изгиб пласта грунта, но, как правило, превышает эту экономию.

Допустим, грунт несвязный. Введём коэффициент $k_{yп}$, учитывающий увеличение площади поликриволинейной поверхности от плоскости и наличие трещин-ответвлений. Допустим, когда ширина пласта грунта $b_{пл} = 10$ мм, $k_{yп} = 1^{14}$, то есть при такой ширине пласта грунта различия между площадью поликриволинейной поверхности и плоскостью несущественны и трещины-ответвления в отделяемом пласте грунта отсутствуют. Предположим, что с увеличением толщины пласта отделяемого грунта коэффициент $k_{yп}$ увеличивается в арифметической прогрессии: при увеличении толщины пласта на 5 мм $k_{yп}$ увеличивается на 0,1¹⁵. Так для пласта грунта толщиной 20 мм $k_{yп} = 1,2$.

Площадь $S_{pп}$ разделения пласта на фрагменты определим как произведение развёртки длины рабочей части ножа l_l на ширину пласта AD (см. рисунок 2, а), равную подаче на нож s_n с учётом коэффициента $k_{yп}$:

$$S_{pп} = k_{yп} l_l s_n. \quad (7)$$

Так как при изгибе пласта преобладает деформация его растяжения, сила непосредственного воздействия передней кромки лезвия ножа, необходимая для разделения пласта грунта на фрагменты,

$$F_{pп} = \sigma_p^B S_{pп}. \quad (8)$$

Силы $F_{сц}$ и $F_{pп}$ направлены перпендикулярно кромке лезвия ножа. Они являются нормальными реакциями кромки лезвия ножа. Угол отклонения лезвия в плоскости резания $\beta = 50^\circ$ ¹⁶. Приложим к точке А на кромке лезвия ножа сумму сил $F_{сц}$ и $F_{pп}$ (красный вектор) и её разложим на составляющие (рисунок 3):

- радиальную, направленную к центру вращения малого ротора (сиреневый вектор);
- окружную, направленную по касательной к траектории точки А (зелёный вектор);
- продольную, направленную параллельно оси вращения малого ротора (жёлтый вектор).

Из пространственной модели сил выявим: радиальную составляющую одного ножа $F_{рад}$, которая стремится сдеформировать нож в радиальном направлении, к центру вращения малого ротора; продольную составляющую $F_{прод}$, которая является силой тяги ножа малого

¹⁴ Николаев В.А. Резание грунта активными рабочими органами. Теория и расчёт: учебное пособие. Ярославль. Изд-во: ЯГТУ, 2023. 560 с.

¹⁵ Там же.

¹⁶ Там же.

ротора; окружную составляющую $F_{окр}$, которую преодолевает вращающий момент привода малого ротора.

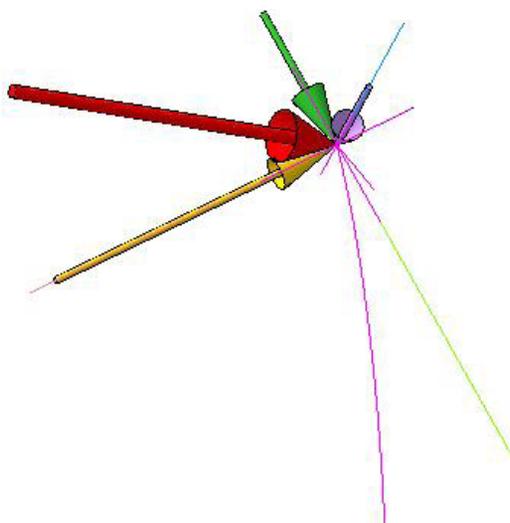


Рисунок 3 – Схема сил воздействия грунта на кромку ножа малого ротора
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Diagram of the forces of soil action on the edge of the knife of a minor rotor
Source: compiled by the author.

Внутренний радиус диска $r_{о3}$, радиус наконечника малого ротора r . Тогда среднее плечо силы $F_{окр}$

$$h_{окр} = r + \frac{r_{о3} - r}{2}. \quad (9)$$

Вращающий момент, необходимый для отделения пласта от массива грунта двумя ножами малого ротора и его разделения на фрагменты,

$$M_{окр кр} = 2F_{окр} h_{окр}. \quad (10)$$

Так как угловая скорость малого ротора $\omega_{мр}$, мощность привода малого ротора, необходимая для отделения пласта от массива грунта и его разделения на фрагменты,

$$N_{окр кр} = N_{отд} + N_{разд} = M_{окр кр} \omega_{мр}. \quad (11)$$

На рисунок 2, а нанесём окружную составляющую $F_{окр}$ и продольную с оставляющую $F_{прод}$ воздействия кромки лезвия ножа на грунт (тонкие векторы).

Мощность, необходимая для преодоления напора грунта на переднюю поверхность ножа

В связи с относительностью движения, предположим, что не нож малого ротора пе-

ремещается в неподвижном грунте, а грунт набегаёт на неподвижный нож. На переднюю поверхность ножа малого ротора действует сила $F_{гм}$ набегающего грунта. Грунт ударяется о неподвижный нож и тормозится им. Разделим переднюю поверхность пополам и обозначим точку B приложения силы $F_{гм}$ (см. рисунок 2, а).

Сила $F_{гм}$ воздействия набегающего грунта равна силе его инерции

$$F_{гм} = F_{j гм} = m_{мр} a = \rho(V_H + V_{сн} + V_3) \frac{v_{окнмр} - v_{кон}}{\tau_{зnm}}, \quad (12)$$

$$F_{гм} = \rho \frac{(V_H + V_{сн} + V_3)}{\tau_{зnm}} (v_{окнмр} - v_{кон}),$$

где плотность грунта $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$; время $\tau_{зnm} = 1 \text{ с}$; V_H – объём грунта, непосредственно воздействующего на нож в секунду; $V_{сн}$ – объём грунта, поступающего в секунду на нож со спирального ножа; V_3 – объём грунта, поступающего в секунду на нож с зубцов, без учёта его разрыхления.

Допустим, набегающий грунт полностью тормозится ножом, $v_{кон} = 0$. Угловая скорость малого ротора $\omega_{мр}$. Среднее плечо окружной силы $h_{окр}$. Тогда средняя окружная скорость грунта, поступающего на нож малого ротора,

$$v_{окнмр} = \omega_{мр} h_{окр}. \quad (13)$$

Объём грунта, непосредственно воздействующего на нож в секунду,

$$V_H = l_n s_n v_{окнмр}. \quad (14)$$

Радиус наконечника малого ротора r . Скорость агрегата v_a . Отсюда объём грунта, поступающего в секунду на нож со спирального ножа без учёта его разрыхления и уплотнения,

$$V_{сн} = \pi r^2 v_a. \quad (15)$$

Наружный радиус диска $r_{в3}$, внутренний радиус диска $r_{о3}$. Объём грунта, поступающего в секунду на нож с зубцов, без учёта его разрыхления,

$$V_3 = \pi(r_{в3}^2 - r_{о3}^2)v_a. \quad (16)$$

Подставив в формулу 12 значения выявленных параметров, получим силу воздействия набегающего грунта. Масса грунта, разрыхляемого малым ротором в секунду,

$$m_{мр} = \rho \frac{(V_H + V_{сн} + V_3)}{\tau_{зnm}}. \quad (17)$$

Нанесём силу воздействия ножа на набегающий грунт, равную силе $F_{гм}$, на рисунок 2, а.

Допустим, среднее плечо силы воздействия ножа на набегающий грунт равно среднему плечу окружной силы, $h_{\text{окр}}$. Вращающий момент, необходимый для преодоления силы инерции набегающего грунта на два ножа малого ротора,

$$M_{\text{Гнмр}} = 2F_{\text{Гм}}h_{\text{окр}}. \quad (18)$$

Мощность привода малого ротора, необходимая для преодоления силы инерции набегающего грунта на два ножа малого ротора,

$$N_{\text{Гнмр}} = M_{\text{Гнмр}}\omega_{\text{мр}}. \quad (19)$$

Мощность, необходимая для ускорения грунта

После торможения набегающего грунта два ножа малого ротора перемещают его в сторону большого ротора, придавая ему ускорение. Грунту придаёт ускорение в сторону большого ротора передняя поверхность ножа. Допустим, начальная скорость перемещения грунта в сторону большого ротора равна нулю. Направление ускорения грунта – параллельно оси вращения малого ротора. Средняя окружная скорость грунта, поступающего на нож, $v_{\text{окнмр}}$. В период ускорения параллельно оси вращения малого ротора грунт переместится по передней поверхности ножа на расстояние $s_{\text{пп}} = 107$ мм (см. рисунок 2, а). Если бы малый ротор не перемещался совместно с агрегатом со скоростью v_a , путь перемещения грунта в направлении большого ротора, в период его ускорения передней поверхностью ножа, состоял бы в первом приближении, из суммы смещения задней поверхности ножа относительно поперечно-вертикальной плоскости и толщины проекции развёртки ножа $b_n = 24$ мм (см. рисунок 2, а). Так как агрегат движется со скоростью v_a , то для упрощения расчёта не будем учитывать смещение задней поверхности ножа относительно поперечно-вертикальной плоскости. Учёт этой составляющей смещения грунта осложнён ещё тем, что она соответствует смещению задней поверхности ножа относительно поперечно-вертикальной плоскости лишь в первом приближении. Во втором приближении следовало бы выявить зависимость этой составляющей смещения грунта параллельно оси вращения малого ротора от расстояния относительно оси вращения малого ротора, поскольку смещение будет различным. Исходя из допущения неразрыв-

ности потока грунта на передней поверхности ножа¹⁷, средняя скорость грунта, покидающего на нож, в направлении, параллельном оси вращения малого ротора,

$$v_{\text{нмр}} = v_{\text{окнмр}} \frac{b_n}{s_{\text{пп}}}. \quad (20)$$

Время перемещения грунта по передней поверхности ножа

$$\tau_{\text{нмр}} = \frac{s_{\text{пп}}}{v_{\text{окнмр}}}. \quad (21)$$

Ускорение грунта параллельно оси вращения малого ротора, в сторону большого ротора,

$$a_{\text{нмр}} = \frac{v_{\text{нмр}}}{\tau_{\text{нмр}}}. \quad (22)$$

Масса грунта, разрыхляемого малым ротором в секунду, $m_{\text{мр}}$. Сила, необходимая для ускорения грунта в сторону большого ротора,

$$F_{\text{нмр}} = a_{\text{нмр}}m_{\text{мр}}. \quad (23)$$

Нанесём эту силу на рисунок 2, а приложив её к точке В. Энергия, необходимая для ускорения грунта в сторону большого ротора,

$$E_{\text{нмр}} = F_{\text{нмр}}b_n. \quad (24)$$

Мощность, необходимая для ускорения грунта в сторону большого ротора,

$$N_{\text{нмр}} = \frac{E_{\text{нмр}}}{\tau_{\text{нмр}}}. \quad (25)$$

Мощность, необходимая для перемещения грунта

Если грунт массой $m_{\text{мр}}$ несвязный, его частицы, ускоренные воздействием передних поверхностей ножей малого ротора, покидают ножи и перемещаются в большой ротор. Если грунт связный, энергия, затраченная на его ускорение, превращается во внутреннюю энергию грунта. Представим, что грунт связный и ножи малого ротора его должны отодвинуть в большой ротор на расстояние b_n (см. рисунок 2, а). Мощность, необходимая для осуществления этого перемещения,

$$N_{\text{пергр}} = m_{\text{мр}}gb_n. \quad (26)$$

Мощность, необходимая для преодоления силы трения грунта о передние поверхности ножей

¹⁷ Николаев В.А. Резание грунта активными рабочими органами. Теория и расчёт: учебное пособие. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2023. 560 с.

Для определения нормальной реакции передней поверхности ножа на воздействие грунта графически сложим все силы (рисунок 2, б). В результате сложения получим нормальную силу $N_{пп}$, перпендикулярную передней поверхности ножа. Сила трения грунта о переднюю поверхность ножа

$$F_{тпп} = f_{с-г} N_{пп}, \quad (27)$$

где $f_{с-г}$ – коэффициент трения грунта о сталь.

Расстояние перемещения грунта по передней поверхности ножа $s_{пп}$ (см. рисунок 2, а). Энергия на преодоление силы трения грунта о передние поверхности двух ножей

$$E_{тпп} = 2F_{тпп}s_{пп}. \quad (28)$$

Период времени перемещения грунта по передней поверхности ножа $\tau_{нмр}$. Мощность, необходимая для преодоления силы трения грунта о переднюю поверхность ножей,

$$N_{тпп} = \frac{E_{тпп}}{\tau_{нмр}}. \quad (29)$$

Общая мощность, необходимая для привода малого ротора и объёмная энергия

Мощность на привод ножей малого ротора

$$N_{гнмр} = N_{окркр} + N_{гнмр} + N_{нмр} + N_{пергр} + N_{тпп}. \quad (30)$$

Общая мощность, необходимая для привода малого ротора,

$$N_{мр} = N_c + N_3 + N_{гнмр}, \quad (31)$$

где N_c – мощность на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт¹⁸; N_3 – мощность на внедрение зубцов в грунт.

Объёмная энергия на внедрение малого ротора в грунт

$$u_{з+нв} = \frac{(N_c + N_3 + N_{гнмр})s}{v_a \cdot 10^3}, \quad (32)$$

где v_a – скорость агрегата; s – перемещение агрегата для разработки грунта объёмом один кубический метр.

Время перемещения агрегата для разработки грунта объёмом один кубический метр

$$\tau_a = \frac{s}{v_a}. \quad (33)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Из рисунка 1 ширина срезаемого зубцом слоя грунта $b_p = 23,5$ мм, толщина срезаемого слоя грунта, срезаемого зубцом, равна подаче на нож $s_n = 20$ мм [21]. Реакция грунта на воздействие внутренней фаски зубца (1):

$$R_{вфз} = 0,3 \cdot 23,5 \cdot 20 = 141 \text{ Н.}$$

Разделим расстояние AB пополам (см. рисунок 1), приложим к точке C силу $R_{вфз}$ и, спроецировав её на нормаль, получим нормальную силу, с которой зуб воздействует на грунт, $N_3 = 57,6$ Н. Сила трения грунта о внутреннюю поверхность зубца (2):

$$F_{тз} = 0,5 \cdot 57,6 = 28,8 \text{ Н.}$$

Трением грунта о наружную поверхность зубца пренебрегаем. Обозначим плечи сил: $h_t = 0,164$ м и $h_r = 0,168$ м. Вращающий момент, необходимый для резания грунта двумя зубцами и преодоления сил трения внутренних поверхностей зубцов о грунт (3):

$$M_3 = 2(141 \cdot 0,168 + 28,8 \cdot 0,164) = 57 \text{ Нм.}$$

Мощность, затрачиваемая на работу зубцов (4),

$$N_3 = 57 \cdot 12,9 = 735 \text{ Вт.}$$

Сила, необходимая для отделения пласта от массива грунта

Из развёртки линии сочленения ножа с поверхностью наконечника малого ротора получим размеры сечения ножа у поверхности наконечника малого ротора (см. рисунок 2, а). Длина рабочей части лезвия ножа $l_n = 265$ мм [21]. Примем длину микроотрыва $l_{отр} = 18$ мм¹⁹. Площадь $S_{отр}$ отрыва пласта от массива перед лезвием (5):

$$S_{отр} = 265 \cdot 18 = 4770 \text{ мм}^2.$$

Примем для свободного резания со скольжением $\sigma_p^B = 0,01$ МПа. Сила, преодолеваемая воздействием передней кромки лезвия ножа, необходимая для преодоления сцепления грунта (6),

$$F_{сц} = 0,01 \cdot 4770 \approx 48 \text{ Н.}$$

¹⁸ Николаев В.А. Резание грунта активными рабочими органами. Теория и расчёт: учебное пособие. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2023. 560 с.

¹⁹ Там же.

Мощность, необходимая для отделения пласта и разделение его на фрагменты

Так для пласта грунта толщиной 20 мм $k_{y_n}=1,2$. Площадь S_{p_n} разделения пласта на фрагменты (7):

$$S_{p_n} = 1,2 \cdot 265 \cdot 20 = 6360 \text{ мм}^2.$$

Сила, воздействия передней кромки лезвия ножа, необходимая для разделения пласта грунта на фрагменты (8),

$$F_{p_n} = 0,01 \cdot 6360 \approx 64 \text{ Н.}$$

Силы $F_{сц}$ и F_{p_n} направлены перпендикулярно кромке лезвия ножа. Приложим к кромке лезвия ножа сумму сил $F_{сц}$ и F_{p_n} (красный вектор) и разложим на составляющие (см. рисунок 3). Из пространственной модели сил: радиальная составляющая (сиреневый вектор) одного ножа $F_{рад}=47,5$ Н, стремится сдформировать нож в радиальном направлении, к центру вращения малого ротора. Продольная составляющая (жёлтый вектор) $F_{прод}=92$ Н, является силой тяги ножа малого ротора. Окружную составляющую (зелёный вектор) $F_{окр}=42,7$ Н преодолевает вращающий момент привода малого ротора.

Внутренний радиус диска $r_{o_3}=165$ мм, радиус наконечника малого ротора $r=31$ мм [21]. Тогда среднее плечо этой силы (9):

$$h_{окр} = 31 + \frac{165-31}{2} = 98 \text{ мм} = 0,098 \text{ м.}$$

Вращающий момент, необходимый для отделения пласта от массива грунта двумя ножами малого ротора и его разделения на фрагменты (10),

$$M_{окр кр} = 2 \cdot 42,7 \cdot 0,098 \approx 8,4 \text{ Нм.}$$

Мощность привода малого ротора, необходимая для отделения пласта от массива грунта и его разделения на фрагменты (11),

$$N_{окр кр} = 8,4 \cdot 12,9 = 108 \text{ Вт.}$$

Продольная составляющая двух ножей (тонкий вектор), направленная по ходу агрегата, $2F_{прод}=184$ Н способствует внедрению малого ротора в грунт.

Мощность, необходимая для преодоления напора грунта на переднюю поверхность ножа

Допустим, набегающий грунт полностью тормозится ножом $v_{кон}=0$. Угловая скорость малого ротора $\omega_{мр} = 12,9 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ [21]. Среднее плечо окружной силы $h_{окр}=0,098$ м. Тогда средняя окружная скорость грунта, поступающего на нож малого ротора (13),

$$v_{окнмр} = 12,9 \cdot 0,098 = 1,26 \text{ м/с.}$$

Длина рабочей части ножа $l_n=265$ мм=0,265 м (см. рисунок 1, а), подача на нож $s_n=20$ мм=0,02 м [28]. Отсюда объём грунта (14)

$$V_n = 0,265 \cdot 0,02 \cdot 1,26 \approx 0,006678 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Радиус наконечника малого ротора $r=31$ мм [21]. Скорость агрегата $v_a = 0,085 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ [4]. Отсюда объём грунта, поступающего в секунду на нож со спирального ножа без учёта его разрыхления и уплотнения (15),

$$V_{сн} = 3,14 \cdot 0,031^2 \cdot 0,085 = 0,000256 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Наружный радиус диска $r_{в_3}=180$ мм, внутренний радиус диска $r_{o_3}=165$ мм [21]. Объём грунта, поступающего в секунду на нож с зубцов, без учёта его разрыхления и уплотнения (16),

$$V_3 = 3,14(0,18^2 - 0,165^2) \cdot 0,085 = 0,001388 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Общий объём грунта, воздействующий на нож в секунду,

$$V_n + V_{сн} + V_3 = 0,006678 + 0,000256 + 0,001388 \approx 0,0086 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Тогда сила воздействия набегающего грунта (12):

$$F_{гм} = 1600 \cdot 0,0086 \cdot 1,26 \approx 16,8 \text{ Н.}$$

Масса грунта, разрыхляемого малым ротором в секунду (17),

$$m_{мр} = 1600 \cdot 0,0086 = 13,3 \text{ кг/с.}$$

Нанесём силу воздействия ножа на набегающий грунт, равную силе $F_{гм}$, на рисунок 2, а. Допустим, среднее плечо силы воздействия ножа на набегающий грунт равно среднему плечу окружной силы, $h_{окр}=0,098$ м. Вращающий момент, необходимый для преодоления силы инерции набегающего грунта на два ножа малого ротора

$$M_{гнмр} = 2 \cdot 16,8 \cdot 0,098 = 3,3 \text{ Нм.}$$

Так как угловая скорость малого ротора $\omega_{мр}=12,9$ рад/с, мощность привода малого ротора, необходимая для преодоления силы инерции набегающего грунта на два ножа малого ротора (19),

$$N_{\text{Г н м р}} = 3,3 \cdot 12,9 = 42 \text{ Вт.}$$

Мощность, необходимая для ускорения грунта

Средняя окружная скорость грунта, поступающего на нож малого ротора, $v_{\text{ок н м р}} = 1,26 \text{ м/с}$. В период ускорения параллельно оси вращения малого ротора грунт переместится по передней поверхности ножа на расстояние $s_{\text{п н}} = 107 \text{ мм}^2$. Если бы малый ротор не перемещался совместно с агрегатом со скоростью v_a , путь перемещения грунта в направлении большого ротора, в период его ускорения передней поверхностью ножа, состоял бы в первом приближении, из суммы смещения задней поверхности ножа относительно поперечно-вертикальной плоскости и толщины проекции развёртки ножа $b_{\text{н}} = 24 \text{ мм}^2$. Исходя из допущения неразрывности потока грунта на передней поверхности ножа, средняя скорость грунта, покидающего на нож, в направлении, параллельном оси вращения малого ротора (20),

$$v_{\text{н м р}} = 1,26 \cdot \frac{0,024}{0,107} = 0,28 \text{ м/с.}$$

Время перемещения грунта по передней поверхности ножа (21):

$$\tau_{\text{н м р}} = \frac{0,107}{1,26} = 0,085 \text{ с.}$$

Ускорение грунта параллельно оси вращения малого ротора, в сторону большого ротора (22):

$$a_{\text{н м р}} = \frac{0,28}{0,085} = 3,3 \text{ м/с}^2.$$

Масса грунта, разрыхляемого малым ротором в секунду, $m_{\text{м р}} = 13,3 \text{ кг/с}$. Сила, необходимая для ускорения грунта в сторону большого ротора (23),

$$F_{\text{н м р}} = 3,3 \cdot 13,3 = 44 \text{ Н.}$$

Нанесём эту силу на рисунок 2, а, приложив её к точке В. Энергия, необходимая для ускорения грунта в сторону большого ротора (24),

$$E_{\text{н м р}} = 44 \cdot 0,024 \approx 1 \text{ Дж.}$$

Мощность, необходимая для ускорения грунта в сторону большого ротора (25),

$$N_{\text{н м р}} = \frac{1}{0,085} \approx 12 \text{ Вт.}$$

Мощность, необходимая для перемещения грунта

Грунт массой $m_{\text{м р}} = 13,3 \text{ кг/с}$ ножи малого ротора должны переместить в большой ротор на расстояние $b_{\text{н}} = 24 \text{ мм} = 0,024 \text{ м}$ (см. рисунок 2, а). Мощность, необходимая для осуществления этого перемещения (26),

$$N_{\text{пер гр}} = 13,3 \cdot 9,8 \cdot 0,024 = 3 \text{ Вт.}$$

Мощность, необходимая для преодоления силы трения грунта о передние поверхности ножей

Для определения нормальной реакции передней поверхности ножа на воздействие грунта на рисунке 2, б сложим все силы. В результате сложения нормальная сила, перпендикулярная передней поверхности ножа, составляет $N_{\text{п н}} = 145 \text{ Н}$. Так как коэффициент трения грунта о сталь принят $f_{\text{с-г}} = 0,5$, сила трения грунта о нож (27):

$$F_{\text{т п н}} = 0,5 \cdot 145 = 72,5 \text{ Н.}$$

Расстояние перемещения грунта по передней поверхности ножа $s_{\text{п н}} = 0,107 \text{ м}$ (см. рисунок 2, а). Энергия на преодоление силы трения грунта о передние поверхности двух ножей (28):

$$E_{\text{т п н}} = 2 \cdot 72,5 \cdot 0,107 = 15,5 \text{ Дж.}$$

Период времени перемещения грунта по передней поверхности ножа $\tau_{\text{н м р}} = 0,085 \text{ с}$. Мощность, необходимая для преодоления силы трения грунта о переднюю поверхность ножей (29),

$$N_{\text{т п н}} = \frac{15,5}{0,085} = 182 \text{ Вт.}$$

Общая мощность, необходимая для привода малого ротора и объёмная энергия

Мощность на привод ножей малого ротора (30):

$$N_{\text{Г н м р}} = 108 + 42 + 12 + 3 + 182 = 348 \text{ Вт.}$$

Мощность на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт $N_{\text{с}} = 1127 \text{ Вт}^2$. Мощность на внедрение зубцов в грунт $N_{\text{з}} = 735 \text{ Вт}$. Общая

²⁰ Николаев В.А. Резание грунта активными рабочими органами. Теория и расчёт: учебное пособие. Ярославль. Изд-во: ЯГТУ, 2023. 560 с.

²¹ Там же.

²² Там же.

мощность, необходимая для привода малого ротора (31),

$$N_{\text{мр}} = 1127 + 735 + 348 = 2209 \text{ Вт} \approx 2,2 \text{ кВт.}$$

Скорость агрегата $v_a = 0,085 \text{ м/с}$ [2], перемещение агрегата для разработки грунта объёмом один кубический метр, $s = 1,274 \text{ м}^{23}$. Объёмная энергия для внедрения малого ротора в грунт (32):

$$u_{\text{к+с}} = \frac{2209 \cdot 1,274}{0,085 \cdot 10^3} = 33,1 \text{ кДж/м}^3.$$

Время перемещения агрегата для разработки грунта объёмом один кубический метр (33):

$$\tau_a = \frac{1,274}{0,085} \approx 15 \text{ с.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Затраты энергии на привод ножей малого ротора включают: энергию на отделение пласта и разделение его на фрагменты, энергию на преодоление напора грунта на переднюю поверхность ножа, энергию на ускорение грунта, энергию на перемещение грунта, энергию на преодоление силы трения грунта о передние поверхности ножей. Общие затраты энергии на привод малого ротора содержат энергию на внедрение в грунт конуса со спиральным ножом, зубцов и ножей малого ротора. В результате расчётов мощность для привода зубцов малого ротора $N_3 = 735 \text{ Вт}$, общая мощность, необходимая для привода малого ротора, $N_{\text{мр}} \approx 2,2 \text{ кВт}$. Объёмная энергия для внедрения малого ротора в грунт $u_{\text{к+с}} = 33,1 \text{ кДж/м}^3$.

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

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

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

²³ Николаев В.А. Резание грунта активными рабочими органами. Теория и расчёт: учебное пособие. Ярославль. Изд-во: ЯГТУ, 2023. 560 с.

20. 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. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66395>

21. 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>

22. 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: TTTPI

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*. Moscow. 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. Definition of the cutting force of soil considering elastic deformation at fracture. *Construction and road building machinery*. 2008; 4: 36-42. (In Russ)

5. Karnauhov A. I., Orlovskij S. N. Costing of specific energy on the cutting process of forest soils end mills. *Construction and road building machinery*. 2010; 1: 20-22. (In Russ)

6. Kravec I. M. Determine critical cutting depth when combined cutting soils gidrofrezozj. *Construction and road building machinery*. 2010; 5: 47-49. (In Russ)

7. Kirillov F. F. Deterministic mathematical model of the temporal distribution of traction for mnogorezcovykh working bodies of earthmoving machine]. *Construction and road building machinery*. 2010; 11: 44-48. (In Russ)

8. Berestov E. I. Influence of friction of soil on the surface of the knife cutting resistance. *Construction and road building machinery*. 2010; 11: 34-38. (in Russ)

9. Balovnev V. I., Nguen Z. Sh. Identification of resistances when designing primers Ripper by a combined indicator of strength. *Construction and road building machinery*. 2005; 3: 38-40. (In Russ)

10. Ryabets N., Kurzner 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; Vol. 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. Study of guided knife systems of ground-moving vehicles. *Construction and road building machinery*. 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. Kabashev R. A., Turgumbaev S. D. Experimental studies of the process of digging soils by rotary-disk working organs under hydrostatic pressure. *Vestnik SibADI*. 2016; 4: 23-28. (In Russ.)

18. Sjomkin D.S. 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.)

19. Konstantinov Ju. V. Methods of calculating the resistance and the moment of resistance to cutting the soil with a straight blade knife cutters. *Tractors and agricultural machinery*. 2019; 5: 31-39. (In Russ.)

20. Parhomenko G. G., Parhomenko S. G. Force analysis of the mechanisms of tillage machines working elements following a specified path. *Tractors and agricultural machinery*. 2018; 1: 47-54. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66395>

21. 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>

22. 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» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88.), ORCID: <https://orcid.org/0000-7503-6612>, SPIN-код: 8865-0397, e-mail: nikolaev53@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolayev – Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machinery Department, Yaroslavl Technical University (Moskovsky Prospekt, 88, Yaroslavl, 150023), ORCID: <https://orcid.org/0000-7503-6612>, SPIN-код: 8865-0397, e-mail: nikolaev53@inbox.ru