

Научная статья

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-512-527>

EDN: QJLXSE



ЭНЕРГИЯ, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ РЕЗАНИЯ ГРУНТА ОКРУЖНЫМИ НОЖАМИ № 4 БОЛЬШОГО РОТОРА ПРЯМОТОЧНОГО РОТОРНОГО РЫХЛИТЕЛЯ

В.А. Николаев

Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия
Nikolaev53@inbox.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема быстрого и качественного строительства дорог, когда объекты хозяйствования и населённые пункты расположены на значительном расстоянии друг от друга, не может быть решена без применения комплекса агрегатов непрерывного действия. Агрегат непрерывного действия, формирующий кювет, и агрегат для проходки туннелей содержат прямоточные роторные рыхлители. Недостаточные теоретические исследования в этой области не позволяют выполнить расчёт взаимодействия с грунтом элементов прямоточного роторного рыхлителя. Поэтому существует необходимость теоретических исследований для определения энергетических параметров большого ротора, в частности, той, которая нужна для резания грунта окружными ножами № 4 большого ротора.

Методика исследования. В предлагаемой статье разработаны методики расчётов необходимых затрат энергии: на отделение пласта от массива грунта; разделение пласта на фрагменты; создание щели в массиве грунта; деформацию части массива грунта; преодоление трения грунта о кромку лезвия; преодоление напора грунта на переднюю поверхность; перемещение грунта передней поверхностью; преодоление трения грунта о переднюю поверхность.

Результаты. На основе данных методик произведены расчёты параметров. Из плоских моделей и пространственной модели сил взаимодействия с грунтом окружных ножей № 4 большого ротора выявлены равнодействующие, их составляющие, нормальные силы. Вычислена сила трения грунта о кромку лезвия и переднюю поверхность окружных ножей № 4. Рассчитана объёмная энергия, необходимая для резания окружными ножами № 4, при разработке прямоточным роторным рыхлителем одного кубического метра грунта.

Заключение. Затраты энергии на привод окружного ножа включают энергию: на отделение пласта от массива грунта; разделение пласта на фрагменты; создание щели в массиве грунта; деформацию части массива грунта; преодоление трения грунта о кромку лезвия; преодоление напора грунта на переднюю поверхность; перемещение грунта передней поверхностью; преодоление трения грунта о переднюю поверхность. В результате расчётов общая энергия, необходимая для резания окружными ножами № 4, при разработке прямоточным роторным рыхлителем одного кубического метра грунта, составила 9110 джоулей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, автодороги, агрегаты непрерывного действия, прямоточный роторный рыхлитель, большой ротор, окружной нож № 4, лезвие

Статья поступила в редакцию 06.12.2023; одобрена после рецензирования 07.06.2024; принята к публикации 14.08.2024.

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. Энергия, необходимая для резания грунта окружными ножами № 4 большого ротора прямоточного роторного рыхлителя // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 512-527. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-512-527>

© Николаев В.А., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-512-527>
EDN: QJLXSE

ENERGY REQUIRED TO CUT THE SOIL WITH NO 4 CIRCUMFERENTIAL KNIVES OF THE LARGE ROTOR OF THE STRAIGHT-THROUGH ROTARY RIPPER

Vladimir A. Nikolaiev
Yaroslavl Technical University,
Yaroslavl, Russia
nikolaev53@inbox.ru

ABSTRACT

Introduction. To solve the problem of the fast and high-quality road construction, when economic facilities and settlements are located at a considerable distance from each other, cannot be solved without the use of a complex of continuous units. The continuous ditch forming unit and the tunneling unit contain straight-through rotary rippers. Insufficient theoretical studies in this area do not enable to calculate the interaction of the elements of a direct-flow rotary ripper with the soil. Therefore, there is a need for theoretical studies to determine the energy parameters of the large rotor, in particular, that which is necessary for cutting the soil with the No.4 circumferential knives of the large rotor.

The research method. The methods for calculating the required energy inputs: to separate the reservoir from the soil mass; separation of the reservoir into fragments; creating a gap in the soil mass; deformation of a part of the soil mass; overcoming the friction of the ground on the edge of the blade; overcoming the soil pressure on the front surface; movement of the soil by the front surface; overcoming the friction of the ground on the front surface have been developed.

Results. On the basis of the developed methods, the parameter calculations were made. From the plane models and the spatial model of the forces of interaction with the soil of the circumferential knives No.4 of the large rotor, resultant forces, their components, normal forces were revealed. The force of friction of the soil on the edge of the blade and the front surface of No.4 circumferential knives was calculated. The volumetric energy required for cutting with No.4 circumferential knives when mining one cubic meter of soil with a straight-through rotary ripper is calculated.

Conclusion. The energy required to drive the circumferential knife includes separating the seam from the soil mass; separation of the reservoir into fragments; creating a gap in the soil mass; deformation of a part of the soil mass; overcoming the friction of the ground on the edge of the blade; overcoming the soil pressure on the front surface; movement of the soil by the front surface; overcoming the friction of the ground on the front surface. As a result of the calculations, the total energy required for cutting with No.4 circumferential knives, when mining one cubic meter of soil with a straight-through rotary ripper, was 9110 joules.

KEYWORDS: construction, roads, continuous units, straight-through rotary ripper, large rotor, No. 4 circumferential knife, blade

The article was submitted 06.01.2023; approved after reviewing 07.06.2024; accepted for publication 14.08.2024.

Author have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Nikolayev V.A. Energy required to cut the soil with No.4 circumferential knives of the large rotor of the straight-through rotary ripper. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 512-527. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-512-527>

© Nikolayev V.A., 2024



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1) разработаны методики расчётов затрат энергии: на отделение пласта от массива грунта; разделение пласта на фрагменты; создание щели в массиве грунта; деформацию части массива грунта; преодоление трения грунта о кромку лезвия; преодоление напора грунта на переднюю поверхность; перемещение грунта передней поверхностью; преодоление трения грунта о переднюю поверхность;

2) разработана методика построения пространственной модели сил взаимодействия с грунтом кромки лезвия окружного ножа № 4;

3) построены схемы действия условных сил на элементы окружного ножа № 4 в плоскостях;

4) рассчитана объёмная энергия, необходимая для резания тремя окружными ножами № 4, при разработке прямоточным роторным рыхлителем одного кубического метра грунта.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема быстрого и качественного строительства дорог, когда объекты хозяйствования и населённые пункты пространственно разобщены, расположены на значительном расстоянии друг от друга, не может быть решена без применения комплекса агрегатов непрерывного действия [1, 2]. Прямоточный роторный рыхлитель, входящий в состав агрегата, формирующего кювет, должен иметь большой ротор и малый ротор, установленный соосно с большим ротором [3]. Рациональный диаметр большого ротора прямоточного роторного рыхлителя 1 м.

К сожалению, существующие теоретические исследования [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21] не позволяют выполнить расчёт взаимодействия с грунтом элементов прямоточного роторного рыхлителя. Поэтому существует необходимость теоретических исследований для выявления геометрических, кинематических, динамических и энергетических параметров элементов конструкции. Ранее в работах [3, 22, 23] были установлены следующие параметры большого ротора: угловая скорость $\omega_p = 5$ рад/с, время одного оборота $\tau_1 = 1,256$ с. На роторе ножи установлены в три ряда, поэтому время 1/3 поворота ротора $\tau_{1/3} = 0,419$ с, подача на нож $s_{нб} = 0,035$ м. Угол β отклонения лезвия каждого окружного ножа в плоскости резания по отношению к направлению резания 30° . Время одного оборота малого ротора $\tau_{1мп} = 0,486$ с.

Из всех унифицированных ножей большого ротора окружной нож № 4 является ближай-

шим к оси ротора. Так как расстояние от оси вращения большого ротора до лезвия окружного ножа № 4 изменяется от 209,5 до 217 мм, среднее расстояние примем $r_{№4} = 0,213$ м. Радиус малого ротора $r_{г.3} = 180$ мм, поэтому толщина слоя грунта между большим ротором и малым ротором варьируется от 29,5 до 37 мм. Этот грунт от воздействия окружных ножей № 4 обрушивается внутрь большого ротора. Для унификации расчётов примем толщину пласта, отделяемого от массива грунта окружным ножом № 4 и всеми торцевыми ножами большого ротора равной подаче на нож, $s_{нб} = 35$ мм. Длина лезвия окружного ножа $l_{л.о№4} = 115,5$ мм. Угол заострения лезвия ножа с учётом его трансформации и перемещения агрегата: $i_{мп} = 16,43^\circ$. Средняя окружная скорость лезвия окружного ножа № 4:

$$\begin{aligned} v_{окр\ №4} &= \omega_p r_{№4} \cdot v_{окр\ №4} = \\ &= 5 \cdot 0,213 \approx 1,07 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

Целью предлагаемого теоретического исследования является определение энергии, необходимой для резания грунта окружными ножами № 4 большого ротора прямоточного роторного рыхлителя.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим резание грунта окружным ножом № 4 без учёта грунта, поступающего с малого ротора. Когда окружной нож № 4 перемещается в верхней части траектории (рисунок 1, а), сила $G_{сн}$ тяжести отрезанного слоя грунта не препятствует, а даже способствует первоначальной деформации отрезаемого пласта грунта. Поэтому окружной нож № 4 в верхней части траектории осуществляет свободное резание и когда приближается к уровню оси ротора лезвием вниз (рисунок 1, б), сила $G_{сн}$ тяжести отрезанного слоя грунта также не препятствует первоначальной деформации отрезаемого грунта. Однако по мере удаления лезвия от уровня оси ротора вниз резание переходит в полузажатое. Когда окружной нож № 4 приближается к уровню оси ротора лезвием вверх (рисунок 1, в), сила $G_{сн}$ тяжести прижимает отрезанный слой грунта к окружному ножу, затрудняя первоначальную его деформацию. Окружной нож № 4 осуществляет полузажатое резание. По мере удаления лезвия от уровня оси ротора вверх резание переходит из полузажатого в свободное. Когда окружной нож № 4 перемещается в нижней части траектории (рисунок 1, г), сила $G_{сн}$ тяжести прижимает отрезанный слой грунта к передней поверхности окружного ножа, препятствуя первоначальной деформации отрезанного пласта.

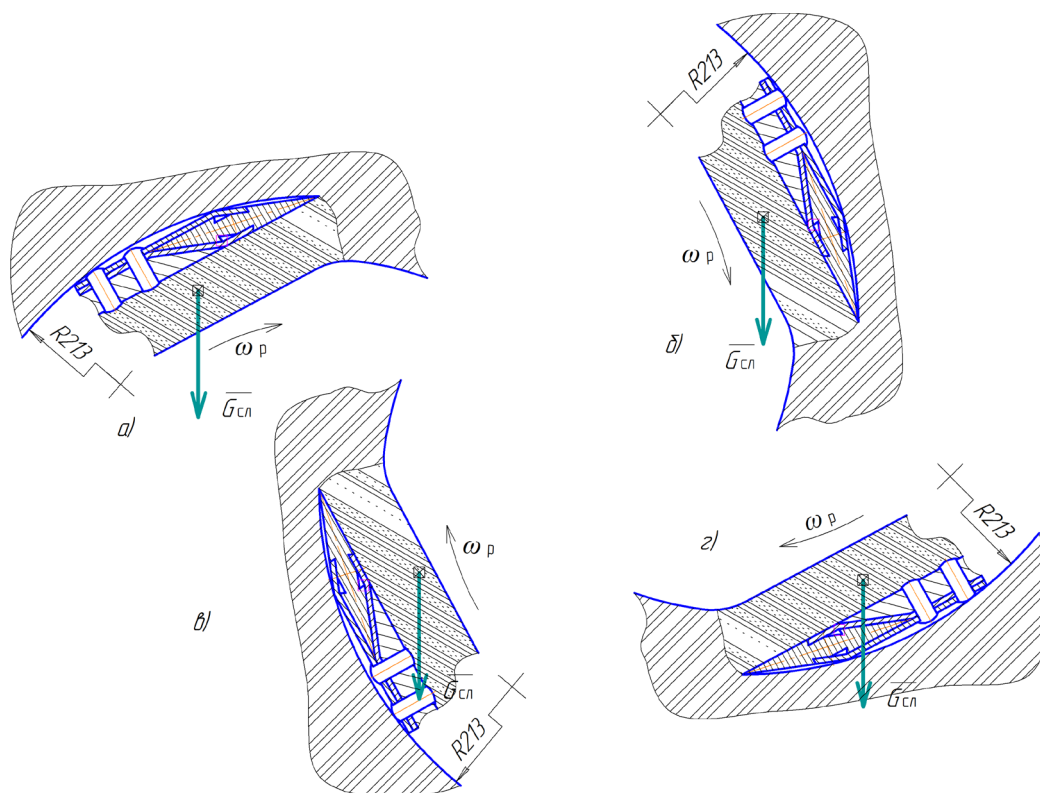


Рисунок 1 – Положения окружного ножа прямооточного роторного рыхлителя при резании грунта:
а – в верхней части траектории; б, в – на уровне оси большого ротора;
г – в нижней части траектории
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Positions of the circumferential blade of a straight-through rotary ripper when cutting soil:
a – in the upper part of the trajectory; б, в – at the level of the axis of the large rotor;
г – at the bottom of the trajectory
Source: compiled by the author.

Окружной нож осуществляет резание, близкое к зажатому. Итак, если бы не поступал грунт с малого ротора, процесс резания грунта окружным ножом № 4 зависел бы от его положения в пространстве.

Однако на резание грунта окружным ножом № 4 оказывает влияние грунт, поступающий с малого ротора массой $m_{мр}$ [23]. Обозначим объёмную массу грунта, разрыхлённого малым ротором, ρ_p . Тогда объём грунта, поступающий с малого ротора,

$$V_{мр} = \frac{m_{мр}}{\rho_p}. \quad (1)$$

Время одного оборота малого ротора $\tau_{1мр}$. Поэтому объём грунта, поступающий с малого ротора во внутреннее пространство между окружными ножами № 4 за один оборот малого ротора,

$$V_{мр-№4} = V_{мр} \tau_{1мр}. \quad (2)$$

Длины проекций лезвий торцевых ножей и лезвий окружных ножей на продольно-радиальную плоскость $l_{пр}$. Расстояние от оси вращения большого ротора до слоя грунта, срезаемого малым ротором $r_{эз}$. Радиус вала привода большого ротора $r_{эбп}$. Объём внутреннего пространства между окружными ножами № 4, без учёта объёма, занимаемого окружными лопастями,

$$V_{о в п №4} = l_{пр} \pi (r_{эз}^2 - r_{эбп}^2). \quad (3)$$

Определим составляющие затрат энергии на привод окружного ножа при разработке грунта объёмом **один кубический метр**.

Затраты энергии на отделение пласта от массива грунта

Передний угол лезвия окружного ножа, с учётом трансформации заточки лезвия, $\alpha_{о4} = 24,63^\circ < \varphi_{с-э}$ [3]. Так как передний угол не превышает угол трения грунта по стали $\varphi_{с-э} \approx 25^\circ$, то при резании произойдёт отрыв

пласта от массива перед лезвием. Образование щели в массиве грунта щели перед лезвием является дискретным явлением, происходит микроотрывами. Примем путь, на котором происходит микроотрыв, $l_{отр} \approx 18$ мм [23].

Заменим дискретный отрыв элементов пласта от массива грунта единовременным явлением так, как будто сразу оторван пласт площадью, равной площади отрыва при разработке одного кубического метра грунта. Допустим, перемещение агрегата при разработке грунта объёмом один кубический метр s , подача на нож $s_{нб}$. Окружные и торцевые ножи установлены в три ряда [3]. Следовательно, количество оборотов большого ротора, необходимое для разработки грунта,

$$n_{бп} = \frac{s}{3s_{нб}}. \quad (4)$$

Длина щели отрыва грунта от массива

$$l_{щ\ №4} = 2\pi r_{\№4} n_{бп} / \cos \delta, \quad (5)$$

где δ – угол наклона спирали, по которой движется точка на лезвии окружного ножа № 4 к плоскости, перпендикулярной оси вращения большого ротора.

Площадь отрыва, то есть щели в массиве грунта от воздействия лезвия окружного ножа № 4,

$$S_{отр\ о\ №4} = s_{нб} l_{щ\ №4}. \quad (6)$$

Примем для полузажатого резания со скольжением предел прочности грунта на растяжение σ_p^s . **Силы, действующие при разработке грунта объёмом один кубический метр, назовём условными силами.** Условная сила, необходимая для преодоления сцепления грунта при отрыве пласта от массива,

$$F_{отр\ о\ №4} = \sigma_p^s S_{отр\ о\ №4}. \quad (7)$$

Примем величину перемещения пласта в процессе его отделения от массива грунта $h_{отр}$. Тогда энергия на создание щелей в массиве при разработке грунта тремя окружными ножами № 4:

$$U_{отр\ о\ №4} = 3F_{отр\ о\ №4} h_{отр}. \quad (8)$$

Затраты энергии на разделение пласта на фрагменты

Коэффициент k_{yn} , учитывающий увеличение площади поликриволинейной поверхности в сравнении с площадью плоскости и наличие трещин-ответвлений [23] при увеличении толщины пласта свыше 10 мм на 5 мм увеличивается на 0,1. Поэтому для пласта грунта тол-

щиной 35 мм $k_{yn} = 1,5$. Площадь поверхности отделения одного фрагмента от другого:

$$S_{р\ о\ №4} = k_{yn} s_{нб} \cdot s_{нб}. \quad (9)$$

Расстояние, на котором происходит разделение пласта на фрагменты, является случайной величиной. Допустим среднее расстояние равно пути одного микроотрыва, $l_{отр}$. Тогда количество разрывов пласта

$$n_{пл\ №4} = \frac{l_{щ\ №4}}{l_{отр}}. \quad (10)$$

Суммарная площадь разрывов пласта грунта

$$S_{\Sigma р\ о\ №4} = S_{р\ о\ №4} n_{пл\ №4}. \quad (11)$$

Условная сила, необходимая для разделения пласта грунта на фрагменты,

$$F_{р\ о\ №4} = \sigma_p^s S_{\Sigma р\ о\ №4}. \quad (12)$$

Так как приняты три окружных ножа, энергия на разделение пласта на фрагменты

$$U_{р\ о\ №4} = 3F_{р\ о\ №4} h_{отр}. \quad (13)$$

Условные силы $F_{отр\ о\ №4}$ и $F_{р\ о\ №4}$ представляют распределённую по кромке лезвия нагрузку, действующую в одном направлении, перпендикулярно передней поверхности окружного ножа № 4. Заменим распределённую нагрузку сосредоточенными **условными** силами, приложенными в некоторой точке к кромке лезвия. Пространственная схема **условных** сил, действующих на кромку лезвия окружного ножа № 4 в этой точке, показана на рисунке 2.

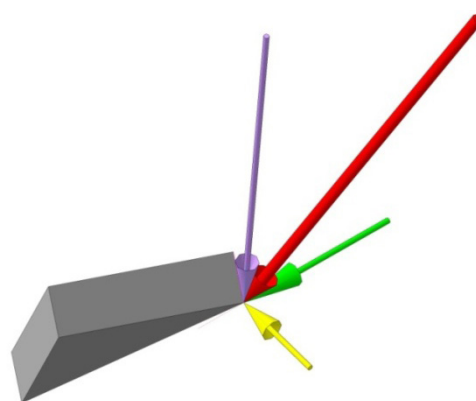


Рисунок 2 – Схема условных сил, действующих на кромку лезвия окружного ножа № 4
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Diagram of conditional forces acting on the edge of the blade of No. 4 circumferential knife
Source: compiled by the author.

Сумму условных сил $F_{отп\ o\ №\ 4} + F_{p\ n\ o\ №\ 4}$ (красный вектор) разложим на:

– радиальную составляющую, направленную от центра вращения большого ротора (синевый вектор);

– окружную составляющую, направленную по касательной к траектории точки лезвия окружного ножа № 4, преодолеваемую вращающим моментом привода большого ротора (зелёный вектор);

– продольную составляющую, направленную параллельно оси вращения большого ротора, создающую силу тяги ножа (жёлтый вектор).

На рисунок 3, а нанесём **условную** окружную составляющую $F_{окр\ o\ №\ 4}$ и **условную** радиальную составляющую воздействия кромки лезвия на грунт, равные соответствующим силам воздействия грунта на кромку лезвия окружного ножа № 4, но противоположно направленные.

Энергия на создание щели в массиве грунта

Часть массива грунта, расположенная вблизи обреза окружного ножа № 4 со стороны направления движения агрегата, находится в сложном напряжённом состоянии, сочетающем напряжения смятия, растяжения, среза и сдвига в разных плоскостях. На рисунке 3, б показано сечение А – А окружного ножа № 4.

При внедрении в массив грунта лезвия окружного ножа № 4, одновременно с отделением пласта от массива, происходит образование щели АЕ в массиве грунта. Ширина щели в массиве грунта зависит от свойств грунта и других факторов. Можно предположить, что затраты энергии на создание щели в массиве грунта оправданы, так как в этой щели будет перемещаться лезвие следующего ножа № 4. Однако это маловероятно по двум причинам. Во-первых, форма и глубина щели в массиве произвольная, зависящая от свойств грунта. Во-вторых, если грунт сыпучий, щель до прохода следующего ножа будет погребена. Поэтому на сопротивление грунта перемещению следующего ножа № 4 наличие щели незначительно влияет.

Для расчёта ширины щели разрыва грунта в массиве примем равной расстоянию микроотрыва: $b_{щ} = l_{отп} = 18$ мм. Площадь щели в массиве грунта от воздействия лезвия окружного ножа № 4:

$$S_{щ\ o\ №\ 4} = b_{щ} l_{щ\ №\ 4}. \quad (14)$$

Условная сила воздействия кромки лезвия одного окружного ножа № 4, необходимая для преодоления сцепления грунта,

$$F_{щ\ №\ 4} = \sigma_p^s S_{щ\ o\ №\ 4}. \quad (15)$$

Энергия на создание щелей в массиве

$$u_{щ\ №\ 4} = 3 F_{щ\ №\ 4} h_{разр}. \quad (16)$$

Направление силы воздействия кромки лезвия окружного ножа № 4, при создании щели в массиве грунта, изменяется. Если подойти строго, можно судить лишь о мгновенном значении этой силы как по величине, так и по направлению. На рисунке 3, а придадим направление **условной** силе под углом трения стали о грунт к **условной** радиальной силе.

Затраты энергии на деформацию части массива грунта

При дальнейшем внедрении в грунт окружного ножа № 4 происходит деформация части массива грунта (см. рисунок 3, б). Если бы отделённый пласт не был связан какое-то время с остальным массивом, затраты энергии на деформирование части массива грунта можно было бы не учитывать. Но поскольку отделённый пласт связан с остальным массивом, затраты энергии на деформирование его нельзя не учитывать. Сложность определения затрат энергии на деформирование заключается в том, что часть массива грунта, расположенная вблизи обреза окружного ножа № 4 со стороны направления движения агрегата, находится в сложном напряжённом состоянии. Допустим, отделение сбоку пласта от массива грунта произойдёт, когда касательные напряжения по линии CD превысят предел прочности грунта на сдвиг.

Допустим, длина линии CD равна подаче на нож $s_{н\ б}$. Длина одной щели при отделении пласта от массива в период разработки 1 грунта $l_{щ}$. Поверхность сдвига пласта грунта относительно массива, проходящая через линию CD, представляет пространственную спиральную ленту, перпендикулярную оси вращения большого ротора. Протяжённость этой поверхности, проходящей через линию CD параллельно движению обреза окружного ножа № 4, не равна длине щели.

При вычислении площади сдвига длину линии CD следовало бы умножить не на длину щели, а на некую среднюю линию поверхности сдвига, то есть спиральной ленты. Однако, учитывая замену сдвига по множеству поверхностей деформацией сдвига по одной поверхности и возможный подпор разрыхлён-

ного грунта, поступающего от малого ротора, при определении общей площади сдвига длину средней линии спиральной ленты примем равной длине щели $l_{щ}$. Тогда площадь сдвига

$$S_{сд о № 4 общ} = S_{н б} l_{щ}. \quad (17)$$

Условная сила воздействия кромки лезвия окружного ножа № 4, приводящая к деформации части массива грунта,

$$F_{деф о № 4} = \tau_{сд}^e S_{сд о № 4 общ}. \quad (18)$$

Примем величину перемещения грунта при деформации части массива равной толщине окружного ножа со щёками (см. рисунок 3, а) $s_{см о № 4}$. Энергия на деформирование части массива

$$u_{деф о № 4} = 3 F_{деф о № 4} s_{см о № 4}. \quad (19)$$

На рисунке 3, а придадим направление силе $F_{деф № 4}$ под углом трения стали о грунт $\varphi_{с-г} = 25^\circ$ к радиальной силе.

Затраты энергии для преодоления трения грунта о кромки лезвий

С рисунка 3, а перенесём на рисунок 3, в и сложим: условную окружную составляющую $F_{окр № 4}$, условную радиальную составляющую $F_{рад № 4}$, условную силу воздействия передней кромки лезвия, направленную на создание щели в массиве грунта $F_{щ № 4}$, условную силу, направленную на сдвиг грунта $F_{деф № 4}$, приведя их к точке А лезвия окружного ножа № 4 и спроецировав на направление, перпендикулярное передней поверхности окружного ножа № 4. Из рисунка выявим условную нормальную реакцию кромки лезвия окружного ножа № 4 $N_{скр о № 4}$. Приведенную нормальную реакцию кромки лезвия окружного ножа № 4 к расстоянию $l_{отр}$ определим из пропорции

$$N_{кр о № 4} = N_{скр о № 4} \frac{l_{отр}}{l_{щ № 4}}. \quad (20)$$

Сила трения грунта о кромку окружного ножа № 4

$$F_{т кр о № 4} = f_{с-г} N_{кр о № 4}. \quad (21)$$

Путь грунта по окружному ножу № 4 равен длине $l_{щ № 4}$ щели отрыва пласта от массива грунта при разработке грунта объёмом один кубический метр. Энергия на преодоление трения грунта объёмом один кубический метр о кромки лезвий трёх окружных ножей № 4

$$u_{т кр о № 4} = 3 F_{т кр о № 4} l_{щ № 4}. \quad (22)$$

Затраты энергии на преодоление напора грунта на передние поверхности окружных ножей № 4

Предположим, что не окружной нож № 4 перемещается в неподвижном грунте, а грунт набегает на неподвижный окружной нож, воздействуя на его переднюю поверхность силой $F_{е № 4}$. Грунт ударяется о неподвижный нож и тормозится им. Разделим переднюю поверхность пополам и обозначим точку В приложения силы $F_{е № 4}$ (см. рисунок 3, а). Средняя окружная скорость грунта, поступающего на окружной нож № 4 большого ротора, равна средней окружной скорости $v_{окр № 4}$ лезвия окружного ножа № 4. Подача на нож $s_{н б}$. Объём грунта, воздействующего на окружной нож № 4 в секунду, без учёта грунта, поступающего от малого ротора,

$$\frac{V_{е о № 4}}{\tau_{е № 4}} = S_{н б} \cdot S_{н б} v_{окр № 4}. \quad (23)$$

Плотность грунта ρ . Масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора в секунду,

$$m_{о № 4} = \rho \frac{V_{е о № 4}}{\tau_{е № 4}}. \quad (24)$$

Заменим постепенное воздействие грунта на нож одномоментным воздействием всей массы, сосредоточенной в пласте при разработке одного кубического метра грунта. Общий объём грунта, воздействующего на окружной нож № 4,

$$V_{е-о № 4-1} = S_{н б} \cdot S_{н б} \cdot l_{щ № 4}. \quad (25)$$

Уточним расчёт. Перемещение агрегата для разработки грунта объёмом один кубический метр, s . Среднее расстояние от оси вращения большого ротора до лезвия окружного ножа № 4 $r_{№ 4}$. Наружный радиус диска малого ротора $r_{г 3}$. Отсюда общий объём грунта, воздействующего на три окружных ножа № 4,

$$V_{е-о № 4} = \pi (r_{№ 4}^2 - r_{г 3}^2) s. \quad (26)$$

Уточнённый объём грунта, воздействующего на один окружной нож № 4,

$$V_{е-о № 4-1} = V_{е-о № 4} / 3. \quad (27)$$

Масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора,

$$m_{общ о № 4} = \rho V_{е-о № 4}. \quad (28)$$

Так как пласт грунта распадается на фрагменты, с достаточной степенью точности можно принять время замедления фрагмента грунта равным времени микроотрыва:

$$\tau_{2-0\text{№}4} = \frac{l_{\text{отр}}}{v_{\text{окр №}4}}. \quad (29)$$

Примем конечную скорость грунта после его замедления $v_{\text{кон о№}4} = 0$. Замедление грунта

$$a_{2-0\text{№}4} = \frac{v_{\text{окр №}4} - v_{\text{кон о№}4}}{\tau_{2-0\text{№}4}}. \quad (30)$$

Условная сила воздействия поступающего грунта на один окружной нож № 4

$$F_{2-0\text{№}4} = a_{2-0\text{№}4} m_{\text{общ о№}4}. \quad (31)$$

Энергия на преодоление напора грунта на переднюю поверхность трёх окружных ножей № 4

$$u_{2-0\text{№}4} = 3F_{2-0\text{№}4} l_{\text{отр}}. \quad (32)$$

Затраты энергии на перемещение грунта передними поверхностями

При перемещении по передней поверхности окружного ножа № 4 (см. рисунок 3, а) отрезанный слой грунта сместится перпендикулярно касательной к окружной скорости на расстояние $s_{\text{см о№}4} = 20$ мм. В зависимости от положения окружного ножа № 4 (см. рисунок 1) на неё будет действовать большая или меньшая доля силы тяжести отрезанного слоя грунта. Доля этой силы тяжести будет равна нулю только в момент, когда окружной нож № 4 перемещается в верхней части траектории (см. рисунок 1, а), когда вектор силы тяжести перпендикулярен передней поверхности. В этот момент слой грунта от воздействия силы тяжести будет падать вниз с ускорением g или с ускорением, создаваемым передней поверхностью окружного ножа № 4. Если разность этих ускорений положительная, грунт будет осыпаться вниз без воздействия передней поверхности окружного ножа. Если разность этих ускорений отрицательная, грунт будет осыпаться вниз от воздействия передней поверхности окружного ножа. Допустим, ускорение грунта, создаваемое передней поверхностью окружного ножа № 4, равно отношению скорости $v_{\text{п п о №}4}$ грунта к времени $\tau_{\text{п п о №}4}$ перемещения грунта по передней поверхности:

$$a_{\text{п п о №}4} = \frac{v_{\text{п п о №}4}}{\tau_{\text{п п о №}4}}.$$

Однако скорость отрезанного слоя грунта зависит от окружной скорости лезвия окружного ножа № 4:

$$v_{\text{п п о №}4} = v_{\text{окр №}4} \frac{s_{\text{см о№}4}}{s_{\text{п п о №}4}},$$

$$\text{а время } \tau_{\text{п п о №}4} = \frac{s_{\text{п п о №}4}}{v_{\text{окр №}4}}.$$

Поэтому ускорение грунта, создаваемое передней поверхностью окружного ножа,

$$a_{\text{п п о №}4} = \frac{v_{\text{окр №}4}^2 s_{\text{см о№}4}}{s_{\text{п п о №}4}^2}. \quad (33)$$

Из дальнейших расчётов видно, что ускорение свободного падения существенно превышает ускорение, создаваемое передней поверхностью окружного ножа № 4. В этом положении (см. рисунок 1, а) грунт будет осыпаться вниз без воздействия передней поверхности окружного ножа.

В положении, показанном на рисунке (см. рисунок 1, б), грунт будет также осыпаться вниз без воздействия передней поверхности окружного ножа № 4 до момента, когда синус угла между вертикалью и передней поверхностью окружного ножа будет меньше отношения ускорения, создаваемого окружным ножом № 4 к ускорению силы тяжести:

$$\sin \delta \leq \frac{a_{\text{п п о №}4}}{g}; \sin \delta \leq \frac{1,145}{9,8} = 0,1168; \delta \leq 6,7^\circ.$$

Следовательно, воздействие передней поверхности окружного ножа № 4 на отрезанный пласт грунта начнётся в момент движения вниз окружного ножа (см. рисунок 1, б), когда его передняя поверхность будет отклонена от вертикали на угол $\delta = 6,7^\circ$, не доходя до вертикали. Закончится воздействие передней поверхности окружного ножа на отрезанный пласт грунта в момент движения вверх окружного ножа № 4 (см. рисунок 1, в), когда его передняя поверхность будет отклонена от вертикали на угол $\delta = 6,7^\circ$ после перехода через вертикаль. То есть это воздействие будет длиться в течение периода времени оборота окружного ножа № 4, когда нож преодолевает нижнюю половину траектории, соответствующем углу поворота

$$\varphi_{\text{п п}} = 180^\circ + 2\delta = 193,4^\circ.$$

Доля угла поворота $\varphi_{\text{п п}}$ в полном обороте окружного ножа № 4:

$$n_{\text{п п}} = 193,4^\circ : 360^\circ \approx 0,537.$$

Общий объём грунта, воздействующего на окружной нож № 4, $V_{\text{э-о№ 4}}$. Масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора, $m_{\text{общ о№ 4}}$. Масса грунта, поступающего с малого ротора в секунду, $m_{\text{м р}}$. Если обозначить период τ_a , то в течение этого времени на один окружной нож № 4 поступит с малого ротора грунт массой

$$m_{\Sigma \text{м р № 4}} = m_{\text{м р}} \cdot \tau_a : 3. \quad (34)$$

Суммарная масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора, и поступающего с малого ротора на один окружной нож № 4:

$$m_{\Sigma \text{о№ 4}} = m_{\text{общ о№ 4}} + m_{\Sigma \text{м р № 4}}. \quad (35)$$

Если бы окружной нож № 4 перемещался в грунте строго горизонтально, то затраты энергии на перемещение грунта его передней поверхностью можно оценить потенциальной энергией подъёма грунта данной суммарной массой на высоту $h_{\text{пп}} = S_{\text{см о№ 4}}$ (см. рисунок 3, а). Чтобы свести движение окружного ножа № 4 по спирали к строго горизонтальному движению, следует скорректировать суммарную массу грунта. При этом, во-первых, суммарную массу грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4, нужно умножить на долю $n_{\text{пп}}$ угла поворота в полном обороте окружного ножа № 4. Во-вторых, нужно учитывать лишь часть суммарной массы грунта при движении по нижнему участку траектории ввиду изменения степени воздействия передней поверхности окружного ножа № 4 на грунт в течение оборота ножа. В процессе перемещения ножа по нижней половине траектории масса грунта, на которую воздействует передняя поверхность окружного ножа № 4, увеличивается плавно от нуля до максимума и уменьшается от максимума до нуля. Поэтому допустим, что средняя масса грунта $m_{\text{ср п п о№ 4}}$, на которую воздействует передняя поверхность окружного ножа № 4, составляет половину от суммарной массы грунта. Приведём суммарную массу грунта, воздействующую на переднюю поверхность окружного ножа № 4, к средней его массе с учётом указанных факторов:

$$m_{\text{ср п п о№ 4}} = 0,5 n_{\text{пп}} m_{\Sigma \text{о№ 4}}. \quad (36)$$

Ускорение грунта, создаваемое передней поверхностью окружного ножа $a_{\text{п п о№ 4}}$. Условная сила инерции грунта, препятствующая его перемещению передней поверхностью в направлении, перпендикулярном передней поверхности,

$$F_{j \text{ п п о№ 4}} = a_{\text{п п о№ 4}} m_{\text{ср п п о№ 4}}. \quad (37)$$

Затраты энергии на перемещение грунта передними поверхностями трёх окружных ножей № 4 в направлении, перпендикулярном каждой передней поверхности, при условно строгом их горизонтальном перемещении, рассчитаем, как увеличение потенциальной энергии грунта:

$$u_{\text{п п о№ 4}} = 3 m_{\text{ср п п о№ 4}} g h_{\text{пп}}. \quad (38)$$

Затраты энергии на преодоление трения грунта о передние поверхности окружных ножей № 4 и общие затраты энергии

Затратами энергии на преодоление силы трения грунта о задние поверхности окружных ножей пренебрегаем. Чтобы определить условную нормальную реакцию передней поверхности окружного ножа № 4, нужно сложить условные силы, действующие на переднюю поверхность. Кроме условной силы тяжести грунта остальные условные силы определены. Если бы грунт, поступающий от малого ротора, производил статическое воздействие на переднюю поверхность окружного ножа № 4, для расчёта условной силы тяжести грунта следовало бы взять среднюю массу грунта, воздействующую на переднюю поверхность окружного ножа $m_{\text{ср п п о№ 4}}$. Однако грунт, поступающий от малого ротора, производит периодическое и аperiodическое динамическое воздействие, падая на передние поверхности окружных ножей № 4. Степень влияния динамического воздействия падающего грунта учесть сложно, поэтому для расчёта условной силы тяжести грунта примем суммарную массу грунта $m_{\Sigma \text{о№ 4}}$. Тогда **условная** сила тяжести грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора и поступающего от малого ротора,

$$G_{\Sigma \text{гр № 4}} = g m_{\Sigma \text{о№ 4}}. \quad (39)$$

На рисунке 3, з сложим в принятом масштабе: условную силу тяжести грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4, условную силу воздействия поступающего грунта $F_{\text{э-о№ 4}}$ и условную силу инерции грунта, препятствующую его перемещению передней поверхностью окружного ножа № 4 в направлении, перпендикулярном передней поверхности $F_{j \text{ п п о№ 4}}$, приведя их к точке В и спроецировав на направление, перпендикулярное передней поверхности окружного ножа № 4. Определим суммарную **условную** силу и противоположно ей направленную **условную** нормальную реакцию передней поверхности данного ножа.

Приведенную нормальную реакцию передней поверхности окружного ножа № 4 к длине передней поверхности окружного ножа № 4 определим из пропорции:

$$N_{ппо№4} = N_{\Sigma ппо№4} \frac{S_{ппо№4}}{l_{що№4}}. \quad (40)$$

Сила трения грунта о переднюю поверхность окружного ножа № 4:

$$F_{тппо№4} = f_{с-г} N_{ппо№4}. \quad (41)$$

Средний путь грунта по передней поверхности окружного ножа № 4 до момента его перемещения на окружную лопасть № 4 равен длине щели отрыва пласта от массива грунта при разработке грунта объемом один кубический метр $l_{щ, №4}$. Энергия на преодоление трения грунта о переднюю поверхность трёх окружных ножей № 4:

$$u_{тппо№4} = 3F_{тппо№4} l_{щ, №4}. \quad (42)$$

Энергия, необходимая для резания окружными ножами № 4, при разработке прямоточным роторным рыхлителем одного кубического метра грунта,

$$u_{о№4} = u_{омпо№4} + u_{рпо№4} + u_{щ, №4} + u_{деф, №4} + u_{ткрпо№4} + u_{г-о№4} + u_{ппо№4} + u_{тппо№4}. \quad (43)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Масса грунта, поступающая с малого ротора, $m_{мр}=13,3$ кг/с [22]. Если принять объемную массу грунта, разрыхленного малым ротором, $\rho_p=1000$ кг/м³, объем грунта, поступающий с малого ротора (1),

$$V_{мр} = \frac{13,3}{1000} = 0,0133 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Время $\tau_{1, мр}=0,486$ с. Объем грунта, поступающего с малого ротора, во внутреннее пространство между окружными ножами № 4, без учёта объема, занимаемого окружными лопастями, за один оборот малого ротора (2):

$$V_{мр-№4} = 0,0133 \cdot 0,486 = 0,00646 \text{ м}^3/\text{об}.$$

Длины проекций лезвий торцевых ножей и лезвий окружных ножей на продольно-радиальную плоскость $l_{пр}=0,1$ м [3]. Расстояние от оси вращения большого ротора до слоя грунта, срезаемого окружными ножами № 4, $r_{гз}=0,180$ м. Наружный диаметр вала большого ротора из конструктивной компоновки 105 мм,

то есть его радиус $r_{гзр}=52,5$ мм=0,0525 м. Объем внутреннего пространства между окружными ножами № 4, без учёта объема, занимаемого окружными лопастями (3),

$$V_{оэп№4} = 0,1 \cdot 3,14(0,18^2 - 0,0525^2) = 0,0093 \text{ м}^3.$$

Следовательно, с учётом объема, занимаемого окружными лопастями, и разрыхления грунта, объем грунта, отрезаемого окружными ножами № 4 и малым ротором, при работе прямоточного роторного рыхлителя сопоставим с объемом внутреннего пространства, поэтому внутреннее пространство между окружными ножами № 4 заполнено грунтом. Этот грунт затрудняет резание. Поэтому примем допущение: окружные ножи № 4 осуществляют полужатое резание вне зависимости от их положения в пространстве.

Затраты энергии на отделение пласта от массива грунта

Перемещение агрегата $s=1,274$ м [3], подача на нож $s_{гб}=0,035$ м. Окружные и торцевые ножи установлены в три ряда. Следовательно, количество оборотов большого ротора (4),

$$n_{бр} = \frac{1,274}{3 \cdot 0,035} \approx 12,13 \text{ об/м}^3.$$

Среднее расстояние от оси вращения большого ротора до окружного ножа № 4

$$r_{№4} = 0,213 \text{ м}.$$

Косинус угла наклона спирали, по которой движется точка на лезвии окружного ножа № 4 к плоскости, перпендикулярной оси вращения большого ротора:

$$\sin \delta = \frac{3s_{гб}}{2\pi r_{№4}} = \frac{3 \cdot 0,035}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,213} = 0,0785;$$

$$\cos \delta = \sqrt{1 - \sin^2 \delta} = 0,997.$$

Длина щели отрыва грунта от массива (5):

$$l_{щ, №4} = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,213 \cdot 12,13 / 0,997 = 16,28 \text{ м/м}^3.$$

Площадь отрыва, то есть щели в массиве грунта от воздействия лезвия окружного ножа № 4 (6),

$$S_{омпо№4} = 0,035 \cdot 16,28 = 0,57 \text{ м}^2/\text{м}^3 = 570000 \text{ мм}^2/\text{м}^3.$$

Условная сила, преодолеваемая воздействием кромки лезвия ножа, необходимая для

преодоления сцепления грунта при отрыве пласта от массива (7),

$$F_{отр\ o\ №\ 4} = 0,04 \cdot 570000 = 22800 \text{ Н/м}^3.$$

Примем $h_{отр}=1$ мм. Энергия на создание щелей в массиве тремя окружными ножами № 4 (8):

$$u_{отр\ o\ №\ 4} = 3 \cdot 22800 \cdot 0,001 \approx 68 \text{ Дж/м}^3.$$

Затраты энергии на разделение пласта на фрагменты

Площадь поверхности отделения одного фрагмента от другого (9):

$$S_{р\ п\ o\ №\ 4} = 1,5 \cdot 35 \cdot 35 = 1838 \text{ мм}^2.$$

На расстоянии $l_{щ\ №\ 4}=16,28$ м произойдёт разделений пласта грунта на фрагменты (10):

$$n_{пл\ №\ 4} = \frac{16,28}{0,018} \approx 904.$$

Суммарная площадь разрывов пласта грунта (11):

$$S_{ср\ п\ o\ №\ 4} = 1838 \cdot 904 = 1657936 \text{ мм}^2/\text{м}^3.$$

Условная сила воздействия кромки лезвия окружного ножа № 4, необходимая для разделения пласта грунта на фрагменты (12), $F_{р\ п\ o\ №\ 4}=0,04 \cdot 1657936=66317 \text{ Н/м}^3$.

Примем $h_{отр}=1$ мм. Энергия на разделение пласта на фрагменты тремя окружными ножами № 4 (13):

$$u_{р\ п\ o\ №\ 4} = 3 \cdot 66317 \cdot 0,001 = 199 \text{ Дж/м}^3.$$

Составим пространственную схему условных сил, действующих на кромку лезвия окружного ножа № 4 в этой точке (см. рисунок 2). Сумма **условных** сил $F_{отр\ o\ №\ 4}+F_{р\ п\ o\ №\ 4}=22800+66317=79117 \text{ Н/м}^3$ (красный вектор). Из пространственной схемы сил выявим составляющие.

Условная радиальная составляющая одного ножа (сиреневый вектор) $F_{рад\ o\ №\ 4}=68990 \text{ Н/м}^3$, соотношение условной радиальной составляющей и суммы условных сил $F_{отр}+F_{р\ п} - 0,884$. **Условная** продольная составляющая (жёлтый вектор) $F_{прод\ o\ №\ 4}=18157 \text{ Н/м}^3$, соотношение условной продольной составляющей и суммы условных сил $F_{отр}+F_{р\ п} - 0,23267$. **Условная** окружная составляющая (зелёный вектор) $F_{окр\ o\ №\ 4}=31630 \text{ Н/м}^3$, соотношение условной

окружной составляющей и суммы условных сил $F_{отр}+F_{р\ п} - 0,40532$.

Энергия на создание щели в массиве грунта

Для расчёта ширины щели разрыва грунта в массиве примем равной расстоянию микроотрыва: $b_{щ}=l_{отр}=18$ мм. Длина щели отрыва грунта от массива $l_{щ\ №\ 4}=16,28 \text{ м/м}^3$. Площадь щели в массиве грунта от воздействия лезвия окружного ножа № 4 (14):

$$S_{щ\ o\ №\ 4} = 0,018 \cdot 16,28 = 0,293 \text{ м}^2/\text{м}^3 = 293000 \text{ мм}^2/\text{м}^3.$$

Условная сила воздействия кромки лезвия одного окружного ножа № 4, необходимая для преодоления сцепления грунта, (15):

$$F_{щ\ №\ 4} = 0,04 \cdot 293000 = 11720 \text{ Н/м}^3.$$

Примем $h_{разр}=1$ мм. Энергия на создание щелей в массиве тремя окружными ножами № 4 (16):

$$u_{щ\ №\ 4} = 3 \cdot 11720 \cdot 0,001 = 35 \text{ Дж/м}^3.$$

Затраты энергии на деформацию части массива грунта

Допустим, длина линии CD (см. рисунок 3, б) равна подаче на нож $s_{н\ б}=0,035$ м. Длина одной щели при отделении пласта от массива в период разработки 1 м³ грунта $l_{щ}=16,28 \text{ м/м}^3$. Площадь сдвига грунта (17):

$$S_{сд\ o\ №\ 4\ об\ щ} = 0,035 \cdot 16,28 = 0,57 \text{ м}^2/\text{м}^3 = 570000 \text{ мм}^2/\text{м}^3.$$

Условная сила воздействия кромки лезвия окружного ножа № 4, приводящая к деформации части массива грунта (18):

$$F_{деф\ o\ №\ 4} = 0,12 \cdot 570000 = 68400 \text{ Н/м}^3.$$

Примем величину перемещения грунта при деформации части массива равной толщине окружного ножа со щёками, (см. рисунок 3, а) $S_{см\ o\ №\ 4}=20$ мм. Энергия на деформирование части массива тремя окружными ножами № 4 (19):

$$u_{деф\ o\ №\ 4} = 3 \cdot 68400 \cdot 0,02 = 4104 \text{ Дж/м}^3.$$

Затраты энергии для преодоления трения грунта о кромки лезвий

На рисунке 3, в сложим: **условную** окружную составляющую $F_{окр\ №\ 4}=31630 \text{ Н/м}^3$, **условную** радиальную составляющую

$F_{\text{рад № 4}} = 68990 \text{ Н/м}^3$, **условную** силу воздействия передней кромки лезвия, направленную на создание щели в массиве грунта $F_{\text{щ № 4}} = 11720 \text{ Н/м}^3$, **условную** силу, направленную на сдвиг грунта $F_{\text{деф № 4}} = 68400 \text{ Н/м}^3$, приведя их к точке А лезвия окружного ножа № 4 и спроецировав на направление, перпендикулярное передней поверхности окружного ножа № 4. Из рисунка условная нормальная реакция кромки лезвия окружного ножа № 4 $N_{\text{скр о № 4}} = 156000 \text{ Н/м}^3$. Приведенную нормальную реакцию кромки лезвия окружного ножа № 4 к расстоянию $l_{\text{отр}} = 0,018 \text{ м}$ определим из пропорции (20): $N_{\text{кр о № 4}} = 156000 \frac{0,018}{16,28} = 172,5 \text{ Н}$. Сила трения грунта о кромку окружного ножа № 4 (21):

$$F_{\text{т кр о № 4}} = 0,5 \cdot 172,5 = 86,25 \text{ Н}.$$

Путь грунта по окружному ножу № 4 равен длине щели отрыва пласта от массива грунта $l_{\text{щ № 4}} = 16,28 \text{ м}$. Энергия на преодоление трения грунта о кромки лезвий трёх окружных ножей № 4 (22):

$$u_{\text{т кр о № 4}} = 3 \cdot 86,25 \cdot 16,28 = 4212 \text{ Дж/м}^3.$$

Затраты энергии на преодоление напора грунта на передние поверхности окружных ножей № 4

Средняя окружная скорость грунта, поступающего на окружной нож № 4 большого ротора, $v_{\text{окр № 4}} = 1,07 \text{ м/с}$. Подача на нож $s_{\text{нб}} = 0,035 \text{ м}$. Объем грунта, воздействующего на окружной нож № 4 в секунду, без учёта грунта, поступающего с малого ротора (23),

$$\frac{V_{\text{э о № 4}}}{\tau_{\text{з э № 4}}} = 0,035 \cdot 0,035 \cdot 1,07 \approx 0,00131 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора в секунду (24),

$$m_{\text{о № 4}} = 1600 \cdot 0,00131 \approx 2,1 \text{ кг/с}.$$

Общий объем грунта, воздействующего на окружной нож № 4 (25),

$$V_{\text{э-о № 4-1}} = 0,035 \cdot 0,035 \cdot 16,28 = 0,019943 \text{ м}^3.$$

Уточним расчёт. Перемещение агрегата для разработки грунта объемом один кубический метр, $s = 1,274 \text{ м}$ [23]. Среднее расстояние от оси вращения большого ротора до лезвия окружного ножа № 4 $r_{\text{№ 4}} = 0,213 \text{ м}$. Наружный радиус диска малого ротора $r_{\text{э.з}} = 0,18 \text{ м}$. Отсюда общий объем грунта, воздействующего на окружные ножи № 4, (26):

$$V_{\text{э-о № 4}} = 3,14(0,213^2 - 0,18^2)1,274 \approx 0,0516 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Уточнённый объем грунта, воздействующего на один окружной нож № 4 (27),

$$V_{\text{э-о № 4-1}} = 0,0516/3 = 0,0172 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора (28),

$$m_{\text{общ о № 4}} = 1600 \cdot 0,0172 \approx 27,5 \text{ кг/м}^3.$$

Время замедления фрагмента грунта (29):

$$\tau_{\text{э-о № 4}} = \frac{0,018}{1,07} \approx 0,0168 \text{ с}.$$

Примем конечную скорость грунта после его замедления $v_{\text{кон о № 4}} = 0$. Замедление грунта (30):

$$\tau_{\text{э-о № 4}} = \frac{0,018}{1,07} \approx 0,0168 \text{ с}.$$

Условная сила воздействия поступающего грунта на один окружной нож № 4 (31):

$$F_{\text{г-о № 4}} = 63,7 \cdot 27,5 = 1752 \text{ Н/м}^3.$$

Энергия на преодоление напора грунта на переднюю поверхность трёх окружных ножей № 4 (32):

$$u_{\text{г-о № 4}} = 3 \cdot 1752 \cdot 0,018 = 95 \text{ Дж/м}^3.$$

Энергия, необходимая для преодоления напора грунта на переднюю поверхность окружных ножей № 4 большого ротора, относительно невелика в связи с малой угловой скоростью большого ротора.

Затраты энергии на перемещение грунта передними поверхностями

Ускорение грунта, создаваемое передней поверхностью окружного ножа (33),

$$a_{\text{п п о № 4}} = \frac{1,07^2 \cdot 0,02}{0,144^2} = 1,145 \text{ м/с}^2.$$

Масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора, $m_{\text{общ о № 4}} = 27,5 \text{ кг/м}^3$. $m_{\text{общ о № 4}} = 27,5 \text{ кг/м}^3$. Масса грунта, поступающего с малого ротора в секунду, $m_{\text{м.р}} = 13,3 \text{ кг/с}$. $m_{\text{м.р}} = 13,3 \text{ кг/с}$. Так как разработка одного кубического метра грунта агрегатом происходит за период $\tau_{\text{а}} = 15 \text{ с}$, $\tau_{\text{а}} = 15 \text{ с}$ [2], то в течение этого времени на один окружной нож № 4 поступит с малого ротора грунт массой (34):

$$m_{\Sigma \text{ п о №4}} = 13,3 \cdot \frac{15}{3} = 66,5 \text{ кг/м}^3.$$

Суммарная масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора, и поступающего с малого ротора на один окружной нож № 4 (35):

$$m_{\Sigma \text{ о №4}} = 27,5 + 66,5 = 94 \text{ кг/м}^3.$$

Доля $n_{\text{п п}} = 0,537$. Допустим, что средняя масса грунта $m_{\text{ср п п о №4}}$, на которую воздействует передняя поверхность окружного ножа № 4, составляет половину от суммарной массы грунта. Приведём суммарную массу грунта, воздействующую на переднюю поверхность окружного ножа, к средней его массе (36):

$$m_{\text{ср п п о №4}} = 0,5 \cdot 0,537 \cdot 94 = 25,24 \text{ кг/м}^3.$$

Условная сила инерции грунта, препятствующая его перемещению передней поверхностью окружного ножа № 4 в направлении, перпендикулярном передней поверхности (37),

$$F_{j \text{ п п о №4}} = 1,145 \cdot 25,24 = 29 \text{ Н/м}^3.$$

Если бы окружной нож № 4 перемещался в грунте строго горизонтально, то затраты энергии на перемещение грунта его передней поверхностью можно оценить потенциальной энергией подъёма грунта данной суммарной массой на высоту $h_{\text{п п}} = s_{\text{см о №4}} = 20 \text{ мм}$ (см. рисунок 3, а). Затраты энергии на перемещение грунта передними поверхностями трёх окружных ножей № 4 в направлении, перпендикулярном каждой передней поверхности, при условно строгом их горизонтальном перемещении, рассчитаем как увеличение потенциальной энергии грунта (38):

$$u_{\text{п п о №4}} = 3 \cdot 25,24 \cdot 9,8 \cdot 0,02 \approx 15 \text{ Дж/м}^3.$$

Затраты энергии на преодоление трения грунта о передние поверхности окружных ножей № 4 и общие затраты энергии

Условная сила тяжести грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора и поступающего с малого ротора (39), $G_{\Sigma \text{ гр №4}} = 9,8 \cdot 94 = 921 \text{ Н/м}^3$.

На рисунке 3, г сложим в принятом масштабе: **условную** силу тяжести грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4, **условную** силу воздействия поступающего грунта $F_{\text{г-о №4}} = 1753 \text{ Н/м}^3$, и условную силу инерции грунта, препятствующую его перемещению

передней поверхностью окружного ножа № 4 в направлении, перпендикулярном передней поверхности $F_{j \text{ п п о №4}} = 29 \text{ Н/м}^3$, приведя их к точке В и спроецировав на направление, перпендикулярное передней поверхности окружного ножа № 4. Определим суммарную **условную** силу и противоположно ей направленную **условную** нормальную реакцию передней поверхности окружного ножа № 4. Из рисунка 3, г **условная** нормальная реакция передней поверхности окружного ножа № 4 $N_{\Sigma \text{ п п о №4}} = 1754 \text{ Н/м}^3$.

Приведенную нормальную реакцию передней поверхности окружного ножа № 4 к длине передней поверхности окружного ножа № 4 определим из пропорции (40):

$$N_{\text{п п о №4}} = 1754 \frac{0,144}{16,28} = 15,5 \text{ Н}.$$

Сила трения грунта о переднюю поверхность окружного ножа № 4 (41):

$$F_{\text{т п п о №4}} = 0,5 \cdot 15,5 = 7,8 \text{ Н}.$$

Средний путь грунта по передней поверхности окружного ножа № 4 до момента его перемещения на окружную лопасть № 4 равен длине щели отрыва пласта от массива грунта $l_{\text{щ №4}} = 16,28 \text{ м}$. Энергия на преодоление трения грунта о переднюю поверхность трёх окружных ножей № 4 (42):

$$u_{\text{т п п о №4}} = 3 \cdot 7,8 \cdot 16,28 = 381 \text{ Дж/м}^3.$$

Энергия, необходимая для резания окружными ножами №4 (43),

$$u_{\text{о №4}} = 68 + 199 + 35 + 4104 + 4212 + 95 + 15 + 381 \approx 9110 \text{ Дж/м}^3.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Затраты энергии на привод окружного ножа включают энергию: на отделение пласта от массива грунта; разделение пласта на фрагменты; создание щели в массиве грунта; деформацию части массива грунта; преодоление трения грунта о кромку лезвия; преодоление напора грунта на переднюю поверхность; перемещение грунта передней поверхностью; преодоление трения грунта о переднюю поверхность. В результате расчётов энергия, необходимая для резания окружными ножами № 4, при разработке прямоточным роторным рыхлителем одного кубического метра грунта, $u_{\text{о №4}} = 9110 \text{ Дж/м}^3$.

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. Сборник, выпуск 41/1, М., 2019 г. 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., 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. 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. Семкин Д.С. О Влиянии скорости рабочих органов землеройных машин на силу сопротивления грунта резанию // Вестник СибАДИ. 2017; (1(53)): 37–43. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1\(53\)-37-43](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-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>. EDN: LQBTMV
23. Николаев В.А. Резание грунта активными рабочими органами. Теория и расчёт. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2023. 560 с.

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. Calculation of the speed of a direct-flow rotary ripper. *Dorogi i mosty*. Collection, issue 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 gidrofrezoy. *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 usloviyah 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-accumulative drive of a ripper with an automatic choice of cutting angles. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 11: 18–20. (In Russ.)

18. 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.)

19. Semkin D.S. About influence of speed working bodies of digging machines on the resistance force of soil cutting. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; (1(53)): 37–43. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1\(53\)-37-43](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-37-43)

20. 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.)

21. 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>

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>. EDN: LQBTMV

23. Nikolaev V.A. Cutting soil by active working bodies. Theory and calculation. Yaroslavl: YSTU Publishing House, 2023: 560. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский просп., 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