

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-800-813>

EDN: PUEBAM

Научная статья



КОНСТРУКТИВНАЯ КОМПОНОВКА И РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БОЛЬШОГО РОТОРА ПРЯМОТОЧНОГО РОТОРНОГО РЫХЛИТЕЛЯ

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема ускорения и удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания комплекса агрегатов непрерывного действия. Агрегаты, следуя друг за другом, осуществляют весь комплекс работ, направленных на строительство автодорог. Применение спутниковой навигации открывает широкие перспективы полной автоматизации агрегатов, поэтому общей целью является создание комплекса агрегатов, осуществляющих непрерывное строительство автомобильных дорог, преимущественно в автоматическом режиме. Одним из устройств, входящих в состав агрегатов непрерывного действия, является прямоточный роторный рыхлитель. Применение прямоточных роторных рыхлителей для разработки грунта сдерживается недостаточным теоретическим обоснованием их параметров. Прежде чем провести анализ взаимодействия элементов рабочих органов прямоточного роторного рыхлителя с грунтом, необходимо уточнить конструктивную компоновку ротора прямоточного роторного рыхлителя.

Методика исследования. Некоторые конструктивные параметры прямоточного роторного рыхлителя получены из логических рассуждений. Другие параметры прямоточного роторного рыхлителя получены путём построения схем воздействия ножа на грунт в плоскости и пространственного моделирования. Изначально для расчёта принят ротор прямоточного роторного рыхлителя диаметром один метр.

Результаты. Окружным и торцевым ножам присвоены номера: №1, №2, №3... по мере приближения от периферии ротора к оси его вращения. На основе принятой методики уточнена конструкция присоединения ножа, передний и задний угол окружных и торцевых ножей. Установлено предельно малое расстояние от оси вращения ротора до ближайшей точки ножа. Отсюда сделан вывод о необходимости, кроме большого ротора, соосно с ним, установить малый ротор. Определена окружная скорость лезвия окружного ножа №1 и угловая скорость большого ротора. Принято расположение ножей в три ряда, то есть ряды ножей по окружности развёрнуты под углом 120° друг относительно друга. Выявлена подача на торцевой нож, то есть толщина пласта, срезаемого торцевым ножом.

Заключение. На основе принятой методики определены геометрические и режимные параметры большого ротора прямоточного роторного рыхлителя. Установлен предельно малый радиус расположения окружных и торцевых ножей большого ротора. Для выемки грунта вблизи оси вращения ротора прямоточного роторного рыхлителя должен быть соосно установлен малый ротор с большей угловой скоростью. Направление вращения малого ротора должно быть противоположным по отношению к направлению вращения большого ротора для частичной компенсации реактивного момента, создаваемого большим ротором.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, автодороги, агрегаты непрерывного действия, прямоточный роторный рыхлитель, большой ротор, окружные ножи, торцевые ножи, геометрические и режимные параметры.

Статья поступила в редакцию 18.10.2022; одобрена после рецензирования 25.10.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Николаев В. А. Конструктивная компоновка и режимные параметры большого ротора прямоточного роторного рыхлителя // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 800-813. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-800-813>

© Николаев В. А., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-800-813>
EDN: PUEBAM

STRUCTURAL LAYOUT AND OPERATING PARAMETERS FOR A LARGE ROTOR OF A DIRECT-FLOW BUCKET WHEEL TYPE AGGREGATOR

Vladimir A. Nikolayev

Yaroslavl Technical University, Yaroslavl, Russia
Nikolaev53@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-7503-6612>

ABSTRACT

Introduction. The problem of accelerating and cheapening the construction of roads without reducing their quality can be solved by creating a complex of continuous units. Units, following each other, carry out the whole complex of works aimed at the construction of roads. The use of satellite navigation opens up broad prospects for full automation of units. Therefore, the overall goal is to create a complex of units that carry out the continuous construction of roads, mainly in automatic mode. One of the devices that make up the continuous units is a direct-flow bucket wheel type aggregator. The use of direct-flow bucket wheel type aggregators for soil development is constrained by insufficient theoretical substantiation of their parameters. Before analysing the interaction of the elements of the working bodies of a direct-flow bucket wheel type aggregator with the soil, it is necessary to clarify the structural layout for the rotor of a direct-flow bucket wheel type aggregator.

The method of research. Some design parameters of a direct-flow bucket wheel type aggregator are derived from logical reasoning. Other parameters of the direct-flow bucket wheel type aggregator are obtained by constructing schemes for the impact of the knife on the ground in the plane and spatial modelling. Initially, the rotor of a direct-flow bucket wheel type aggregator with a diameter of one meter was adopted for calculation.

Results. The circular and end knives are assigned the numbers No 1, No 2, No 3, etc. as it approaches from the periphery of the rotor to the axis of its rotation. On the basis of the adopted methodology, the design of the knife attachment, the front and back corner of the circular and end knives have been clarified. An extremely small distance from the axis of rotation of the rotor to the nearest point of the knife is established. Hence the conclusion is made that in addition to a large rotor, in conjunction with it, it is necessary to install a small rotor. The circumferential velocity of the blade of no. 1 circumferential knife and the angular velocity of the large rotor are determined. It is customary to arrange the knives in three rows, that is, the rows of knives around the circumference are deployed at an angle of 120° relative to each other. The feed on the end knife was revealed, that is, the thickness of the layer cut by the end knife.

Conclusion. On the basis of the adopted methodology, the geometric and mode parameters of a large rotor of a direct-flow bucket wheel type aggregator have been determined. An extremely small radius of location of the circular and end knives of the large rotor is established. To excavate the soil near the axis of rotation for the rotor of the direct-flow bucket wheel type aggregator, a small rotor with a higher angular velocity shall be coaxially installed. The direction of rotation of the small rotor shall be opposite to the direction of rotation of the large rotor in order to partially compensate for the reactive moment produced by the large rotor.

KEYWORDS: construction, roads, continuous units, direct-flow bucket wheel type aggregator, large rotor, circular knives, end knives, geometric and mode parameters.

The article was submitted 18.10.2022; approved after reviewing 25.10.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Nikolayev V. A. 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. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-800-813>

© Nikolayev V. A., 2022



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1) уточнена конструкция присоединения ножа, передний и задний угол окружных и торцевых ножей;

2) установлено предельно малое расстояние от оси вращения ротора до ближайшей точки ножа большого ротора;

3) определена угловая скорость большого ротора и толщина пласта, срезаемого торцевым ножом;

4) построена зависимость предельно малого радиуса, на котором может быть расположено лезвие окружного ножа, от угла отклонения лезвия по отношению к направлению, перпендикулярному резанию.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема ускорения и удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания комплекса агрегатов непрерывного действия [1]. Агрегаты, следуя друг за другом, осуществляют весь комплекс работ, направленных на строительство автодорог. Применение спутниковой навигации открывает широкие перспективы полной автоматизации агрегатов, поэтому общей целью является создание комплекса агрегатов, осуществляющих непрерывное строительство автомобильных дорог, преимущественно в автоматическом режиме.

Одним из устройств, входящих в состав агрегатов непрерывного действия, является прямооточный роторный рыхлитель^{1,2}. Прямоточные роторные рыхлители предназначены для рыхления грунта с последующим его удалением другими техническими средствами. На рисунке 1 показан вариант применения прямооточного роторного рыхлителя в составе агрегата для устройства кюветов³, каналов. Агрегат включает энергетическое устройство рыхлите-

ля 3 с черенковым ножом 1, установленным на передней навеске 2. Прямоточный роторный рыхлитель 11 размещён на раме рыхлителя 8, присоединённой к задней навеске 5. Привод прямооточного роторного рыхлителя может быть как от гидромотора, так и механическим, включающим коробку отбора мощности 4, карданный вал привода рыхлителя 6, передачу 7, предохранительное устройство 9 и подшипниковый узел 10.

Предварительная схема прямооточного роторного рыхлителя с четырьмя рядами ножей, то есть ряды ножей развёрнуты по окружности под углом 90° друг относительно друга, показана на рисунке 2. Цельносварной ротор содержит вал 5 с приваренным к нему опорным диском 4, с держателями 7 и лопастями 6. К лопастям присоединены окружные ножи 1 и торцевые ножи 3, установленные уступом. К валу присоединён спиральный нож 2.

Хотя теоретические основы разработки грунта весьма подробно рассмотрены^{4,5} [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24], взаимодействие с грунтом элементов прямооточного роторного рыхлителя почти не изучены. Применение прямооточных роторных рыхлителей для разработки грунта сдерживается недостаточным теоретическим обоснованием их параметров. Так, некоторые исследователи пытались для разработки грунта использовать прямооточный роторный рыхлитель с ножами, сходными по форме с лопастями самолётного или корабельного винта⁶. Без достаточного теоретического обоснования эти попытки оказались неудачными. Прежде чем провести анализ взаимодействия элементов рабочих органов прямооточного роторного рыхлителя с грунтом, необходимо уточнить конструктивную компоновку ротора прямооточного роторного рыхлителя.

¹ Патент РФ №2735497. Прямоточный роторный рыхлитель / Николаев В.А. Заявл. 09.01.2019 №2019100367 // Оpubл. 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 // Оpubл. 23.12.2019, бюл. №36. 13 с.

³ Патент РФ №2709849. Агрегат непрерывного действия, формирующий кювет и основание автомобильной дороги. Там же.

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

⁶ Исследование рабочих органов землеройных машин непрерывного действия. Сборник под ред. З.Е. Гарбузова. М.: 1966. 88 с.

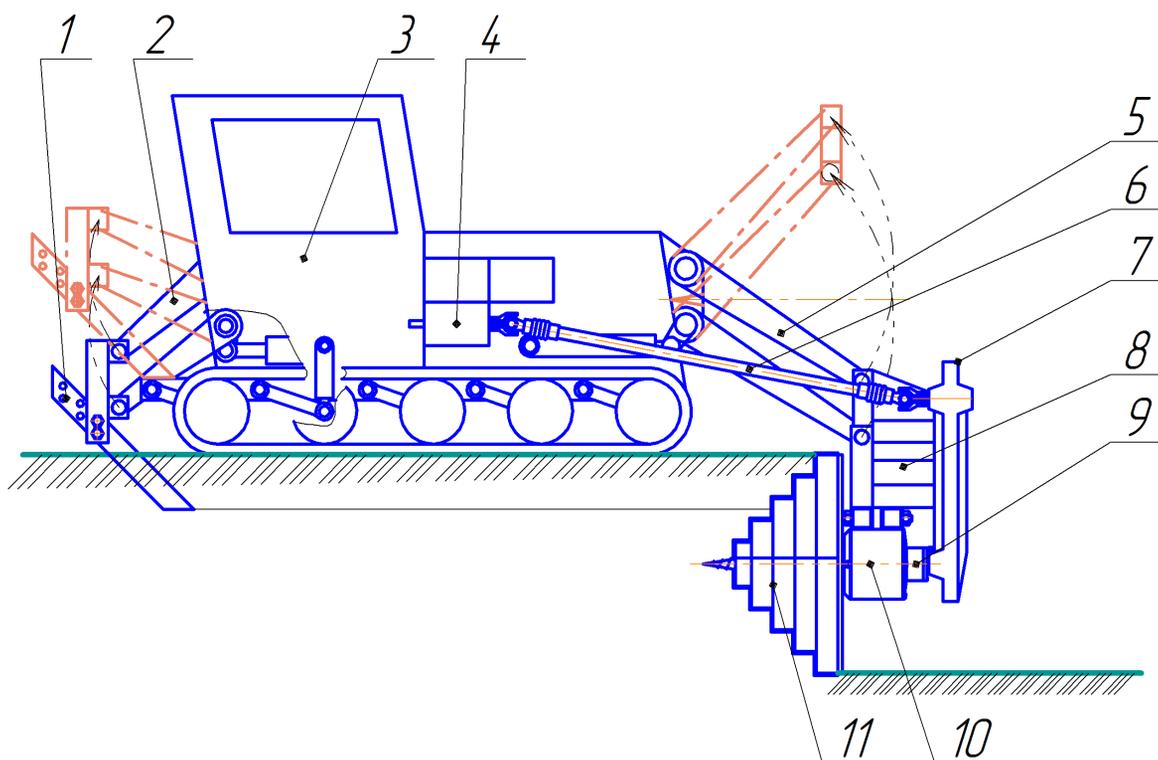


Рисунок 1 – Схема прямооточного роторного рыхлителя в агрегате с энергетическим устройством:
 1 – черенковый нож; 2 – передняя навеска; 3 – энергетическое устройство рыхлителя;
 4 – коробка отбора мощности; 5 – задняя навеска; 6 – карданный вал привода рыхлителя;
 7 – передача; 8 – рама рыхлителя;
 9 – предохранительное устройство; 10 – подшипниковый узел;
 11 – прямооточный роторный рыхлитель
 Источник: составлено автором.

Figure 1 – Diagram of a direct-flow bucket wheel type aggregator in a unit with an energy device:
 1 – cuttings knife; 2 – front hitch; 3 – energy device of the ripper; 4 – power take-off;
 5 – rear hitch; 6 – driveshaft of the ripper drive;
 7 – transmission; 8 – ripper frame; 9 – safety device; 10 – bearing unit;
 11 – direct-flow bucket wheel type aggregator
 Source: compiled by the authors.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Некоторые конструктивные параметры прямооточного роторного рыхлителя получаются из логических рассуждений. В частности, применять в прямооточном роторном рыхлителе длинные дорогостоящие ножи нецелесообразно. В грунте возможны камни и другие предметы, при воздействии на которые дорогостоящие ножи могут погнуться или сломаться. Поэтому в прямооточном роторном рыхлителе целесообразно использовать множество унифицированных ножей небольшой величины ромбовидного поперечного сечения (рисунок 3), которые можно было бы легко заменить при их повреждении.

Для закрепления окружные и торцевые ножи имеют выемку с обратной фаской. Ромбовидное поперечное сечение ножа создаёт возможность двукратного увеличения срока

его службы путём разворота на 180° после затупления режущей кромки.

Угол заточки ножа должен быть меньше угла трения стали о грунт. Он варьируется в широких пределах, но в среднем $\varphi_{c-r} \approx 26^\circ$. Если угол заточки ножа будет больше угла трения стали о грунт, то резание лезвием грунта трансформируется в резание пуансоном. С другой стороны, слишком малый угол заточки приведёт к выкрашиванию лезвия при резании. Исходя из этого, примем угол заточки лезвия $i=20^\circ$. Тогда размеры элементов ножа в его поперечном сечении получаются из конструктивной компоновки.

Другие параметры прямооточного роторного рыхлителя получены путём построения схем воздействия ножа на грунт в плоскости и пространственного моделирования. Изначально для расчёта принят ротор прямооточного роторного рыхлителя диаметром один метр.

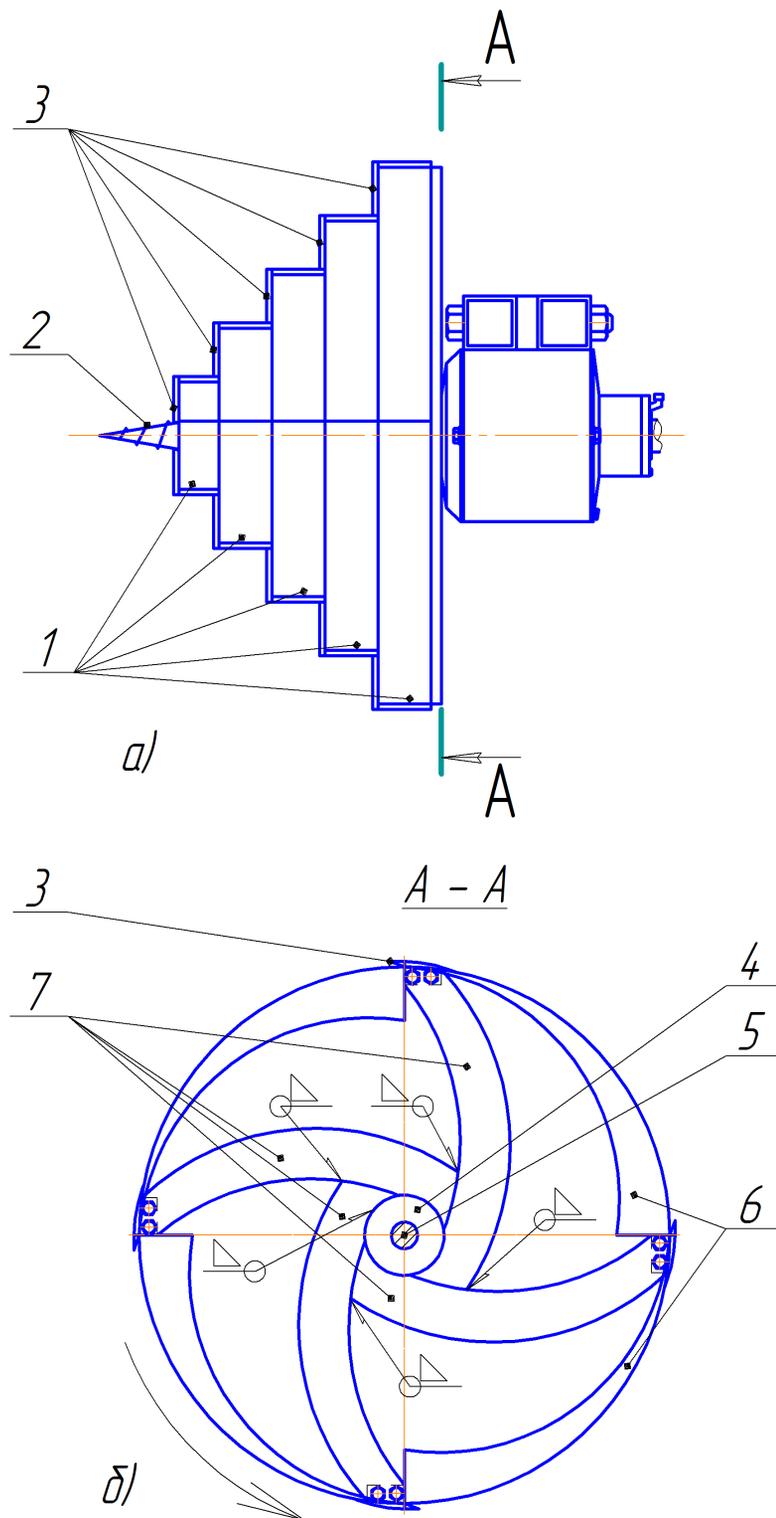


Рисунок 2 – Прямоточный роторный рыхлитель: а – вид сбоку; б – разрез А – А; 1 – окружной нож; 2 – спиральный нож; 3 – торцевой нож; 4 – опорный диск; 5 – вал; 6 – лопасть; 7 – держатель
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Direct-flow bucket wheel type aggregator: a) side view; b) incision A – A; 1 – circular knife; 2 – spiral knife; 3 – end knife; 4 – support disc; 5 – shaft; 6 – blade; 7 – holder
Source: compiled by the authors.

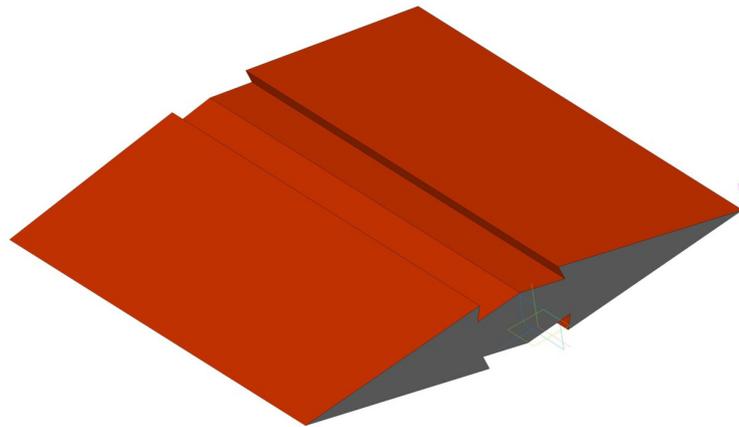


Рисунок 3 – Ромбовидный нож
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Diamond knife
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Присвоим окружным и торцевым ножам номера: №1, №2, №3... по мере приближения от периферии ротора к оси его вращения. Допустим, лезвие окружного ножа параллельно оси

вала ротора. Изобразим сечение окружного ножа №1 поперечно-вертикальной плоскостью (рисунок 4), то есть плоскостью, перпендикулярной оси вращения ротора, когда его лезвие находится в нижнем положении.

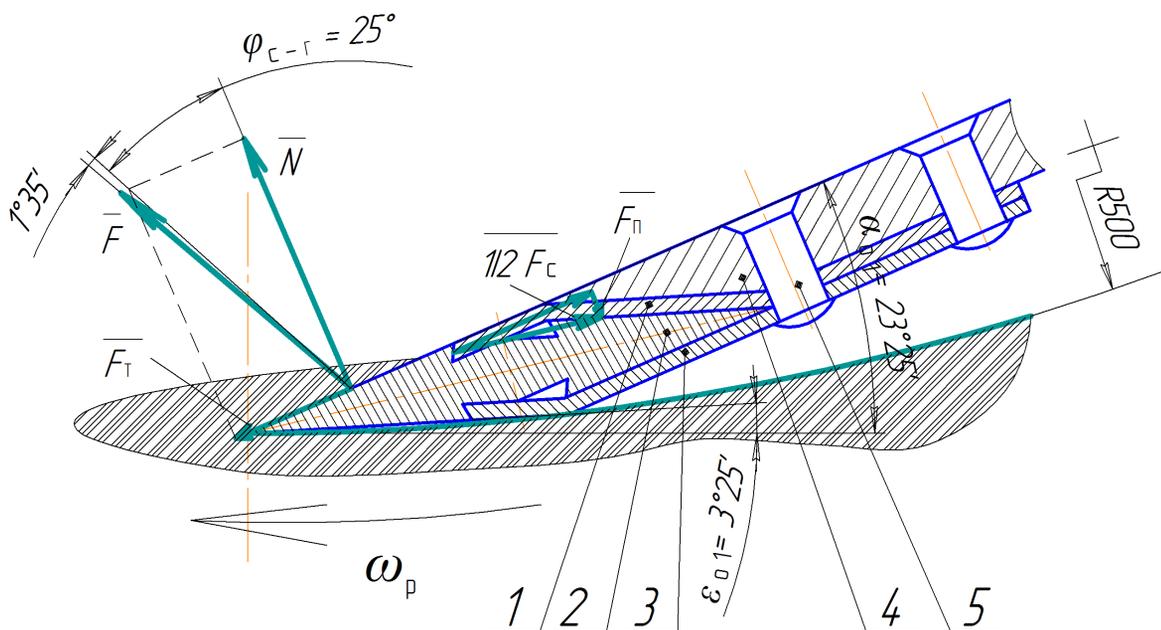


Рисунок 4 – Конструкция присоединения ножа и схемы сил взаимодействия окружного ножа №1, наиболее удалённого от вала, и грунта: 1 – внутренняя щека; 2 – нож; 3 – наружная щека; 4 – лопасть; 5 – заклёпка
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Design of the knife attachment and the scheme of interaction forces of the circumferential knife No. 1, the most distant from the shaft, and the ground: 1 – inner cheek; 2 – knife; 3 – outer cheek; 4 – blade; 5 – Rivet
Source: compiled by the authors.

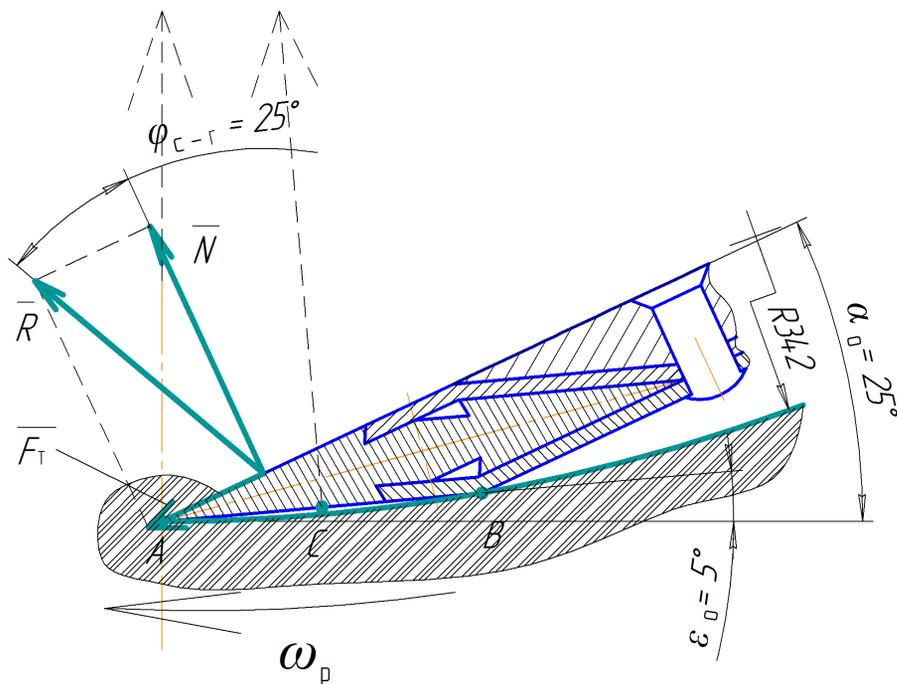


Рисунок 5 – Определение минимального радиуса ротора, когда лезвие ножа параллельно его продольно-радиальной плоскости
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Determination of the minimum radius of the rotor, when the blade of the knife is parallel to its longitudinal-radial plane
Source: compiled by the authors.

К лопасти 4 заклёпками 5 приклепаны внутренняя щека 1 и наружная щека 3, которые выполнены из пружинной стали. Нож 2 вставляют между внутренней щекой и наружной щекой. Из схемы сил воздействия обратной фанки ножа на внутреннюю щеку видно, что при резании появится сила F_n , прижимающая внутреннюю щеку к ножу. Равная ей сила с другой стороны будет прижимать к ножу наружную щеку. При этом чем больше сила сопротивления грунта резанию, тем больше сила F_n . Это обеспечит надёжность присоединения ножа.

Из построения видно, что задний угол окружного ножа №1, наиболее удалённого от вала, $\epsilon_{o1} \approx 3,4^\circ$. Если лезвие ножа параллельно оси вала, передний угол окружного ножа №1 $\alpha_{o1} = \epsilon_{o1} + i = 3,4 + 20 \approx 23,4^\circ$. Схема сил воздействия передней поверхности ножа на грунт показывает, что сила воздействия ножа на грунт отклонена от нормали на угол, превышающий угол трения стали о грунт. Поэтому грунт не будет упираться в переднюю поверхность окружного ножа №1, а будет скользить по ней. Произойдёт резание лезвием.

Обозначим лезвие в сечении окружного ножа точкой А (рисунок 5). Допустим, что наружная щека касается грунта в точке В.

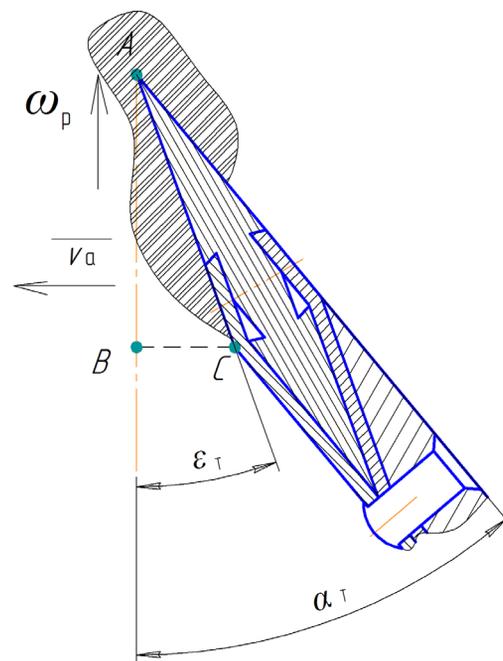


Рисунок 6 – Взаимодействие с грунтом торцевого ножа №1, наиболее удалённого от оси вращения ротора
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Interaction with the ground of the end knife No 1, the farthest from the axis of rotation of the rotor
Source: compiled by the authors.

Разделив отрезок AB пополам, проведём из точки C луч до пересечения с вертикальным лучом из точки A лезвия окружного ножа. Из полученного центра проведём дугу, проходящую через точки A и B , измерим её радиус. Если лезвие окружного ножа параллельно оси вала ротора, минимально возможный радиус, на котором окружной нож, наименее удалённый от оси вращения ротора, может осуществлять резание лезвием, 342 мм.

Рассмотрим взаимодействие с грунтом торцевого ножа №1, наиболее удалённого от оси вращения ротора (рисунок 6). Он вращается с угловой скоростью ω_p и перемещается совместно с агрегатом со скоростью v_a . Чтобы осуществлять резание лезвием, передний угол торцевого ножа, так же как и окружного ножа, должен быть $\alpha_r \leq 26^\circ$. Допустим, $\alpha_r = 25^\circ$, тогда задний угол $\varepsilon_r = 5^\circ$. Чтобы задняя поверхность ножа не упиралась в грунт, пока точка B переместится на расстояние BC , точка A должна переместиться по дуге на расстояние AB . При движении торцевого ножа, наиболее удалённого от оси вращения ротора, дуга AB незначительно отличается от отрезка AB , поэтому

$$\tan \varepsilon_{r1 \min} = \frac{BC}{AB} = \frac{v_a}{v_{r1 \max}}$$

где $v_{r1 \max}$ – окружная скорость точки на торцевом ноже, наиболее удалённой от оси вращения ротора, равная минимальной окруж-

ной скорости лезвия окружного ножа №1: $v_{r1 \max} = v_{окр1} = v_{окр \min}$. Отсюда

$$v_{окр1} = \frac{v_a}{\tan \varepsilon_{r1 \min}} \tag{1}$$

Так как рабочая скорость агрегата $v_a = 0,085$ м/с [25], $v_{окр1} = 0,97$ м/с. Чтобы не было трения задней поверхности торцевого ножа №1 о грунт при его резании, примем минимальную окружную скорость торцевого ножа №1, равную максимальной окружной скорости наружной точки лезвия окружного ножа: $v_{окр1 \min} = v_{r1 \max} = 1$ м/с.

Располагать лезвия окружных ножей параллельно оси вала ротора нерационально. Для уменьшения затрат энергии желательно, чтобы выполнялось резание со скольжением. Когда лезвие ножа осуществляет резание со скольжением, то происходит трансформация угла заострения ножа в сторону его уменьшения. Для унификации ножей желательно, чтобы угол отклонения лезвия в плоскости резания торцевых и окружных ножей был одинаковым. Между тем, чтобы осуществлять резание лезвием, передний угол должен быть $\alpha_{r,o} \leq 25^\circ$. Путём пространственного моделирования определим угол заострения лезвия ножа в зависимости от угла отклонения лезвия в плоскости резания β . Зависимость угла заострения лезвия от угла отклонения лезвия от направления, перпендикулярного резанию, если угол заточки лезвия 20° , показана на рисунке 7.

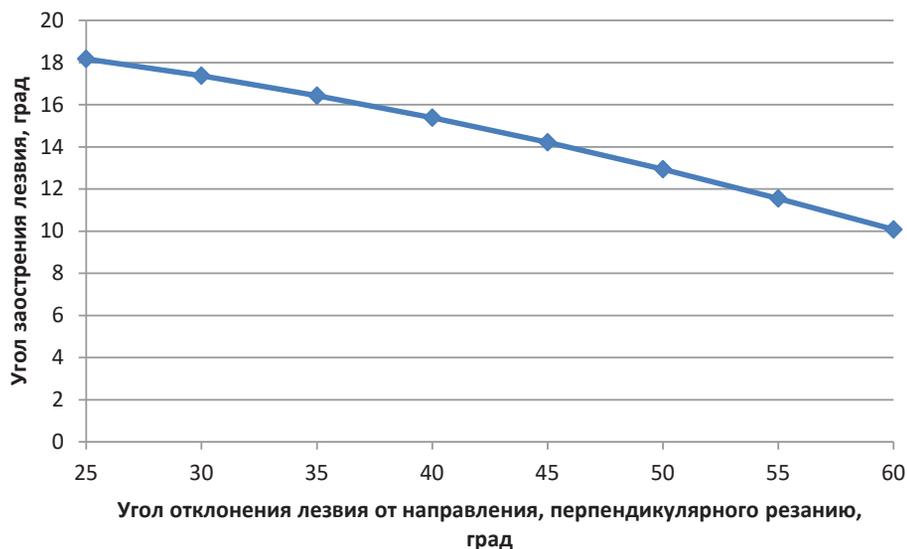


Рисунок 7 – Зависимость угла заострения лезвия от угла отклонения лезвия от направления, перпендикулярного резанию; угол заточки лезвия 20°
 Источник: составлено автором.

Figure 7 – Dependence of the angle of sharpening of the blade on the angle of deviation of the blade from the direction perpendicular to cutting; blade sharpening angle 20°
 Source: compiled by the authors.

Чем больше угол β отклонения лезвия в плоскости резания по отношению к направлению резания, тем больше трансформация угла заострения лезвия, тем меньше угол заострения лезвия ножа. При увеличении угла β уменьшается предельно малый радиус, на котором может быть расположено лезвие окружного ножа при условии $\alpha_{\tau,0} \leq 25^\circ$. Одновременно с увеличением угла β увеличивается длина лезвия ножа.

Чтобы грунт проходил в пространстве между торцевыми ножами, расстояние между их лезвиями должно превышать толщину срезаемого слоя грунта. Исходя из размеров ромбовидного ножа (см. рисунок 3), примем длины проекций лезвий торцевых ножей на продольно-радиальную плоскость 100 мм. Для унификации проекции лезвий окружных ножей на продольно-радиальную плоскость также примем 100 мм.

Чтобы избежать воздействия грунта на поверхность, торцевой нож должен быть распо-

ложен так, чтобы его лезвие было не в продольно-радиальной плоскости, а под углом как к продольно-радиальной плоскости, так и к направлению движения агрегата. Аналогично формуле (1) для точки лезвия торцевого ножа №1, приближенной к оси вращения ротора,

$$\begin{aligned} \tan \varepsilon_{\tau 1 \max} &\geq \frac{v_a}{v_{\tau 1 \min}}; \\ \tan \varepsilon_{\tau 1 \max} &\geq \frac{0,085}{0,8} = 0,106; \\ \varepsilon_{\tau 1 \max} &\geq \arctg 0,106 = 6,06^\circ. \end{aligned} \quad (2)$$

Выполнив построения, аналогичные изображенным на рисунке 5, выявим предельно малые радиусы, на которых может быть расположено лезвие окружного ножа в роторе, когда оно не параллельно продольно-радиальной плоскости ротора (рисунки 8, 9). Зависимость длины лезвия от угла отклонения лезвия по отношению к направлению, перпендикулярно-му резанию, показана на рисунке 10.

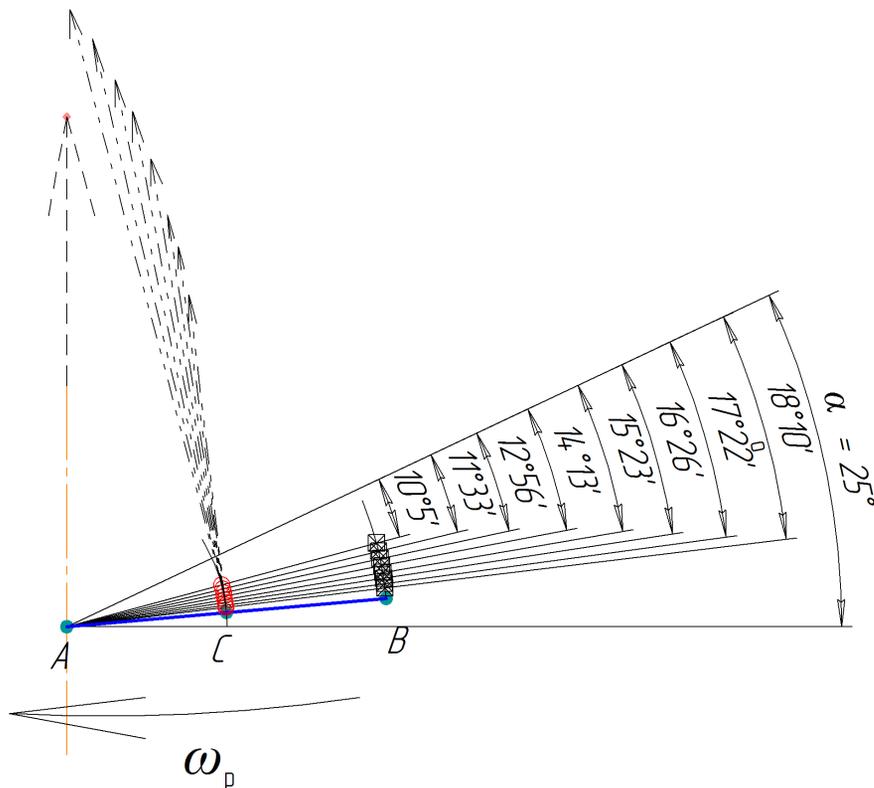


Рисунок 8 – К определению предельно малого радиуса, на котором может быть расположено лезвие окружного ножа, от угла отклонения лезвия по отношению к направлению, перпендикулярному резанию
Источник: составлено автором.

Figure 8 – To determine the extremely small radius on which the blade of the circumferential knife can be located, from the angle of deflection of the blade in relation to the direction perpendicular to the cutting
Source: compiled by the authors.

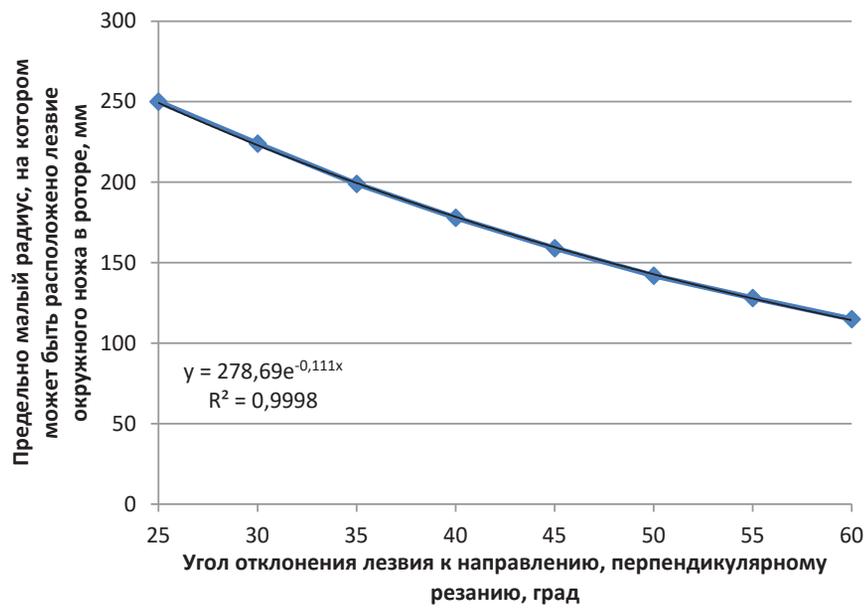


Рисунок 9 – Зависимость предельно малого радиуса, на котором может быть расположено лезвие окружного ножа, от угла отклонения лезвия по отношению к направлению, перпендикулярному резанию. Источник: составлено автором.

Figure 9 – Dependence of the extremely small radius on which the blade of the circumferential knife can be located on the angle of deflection of the blade in relation to the direction perpendicular to the cutting. Source: compiled by the authors.

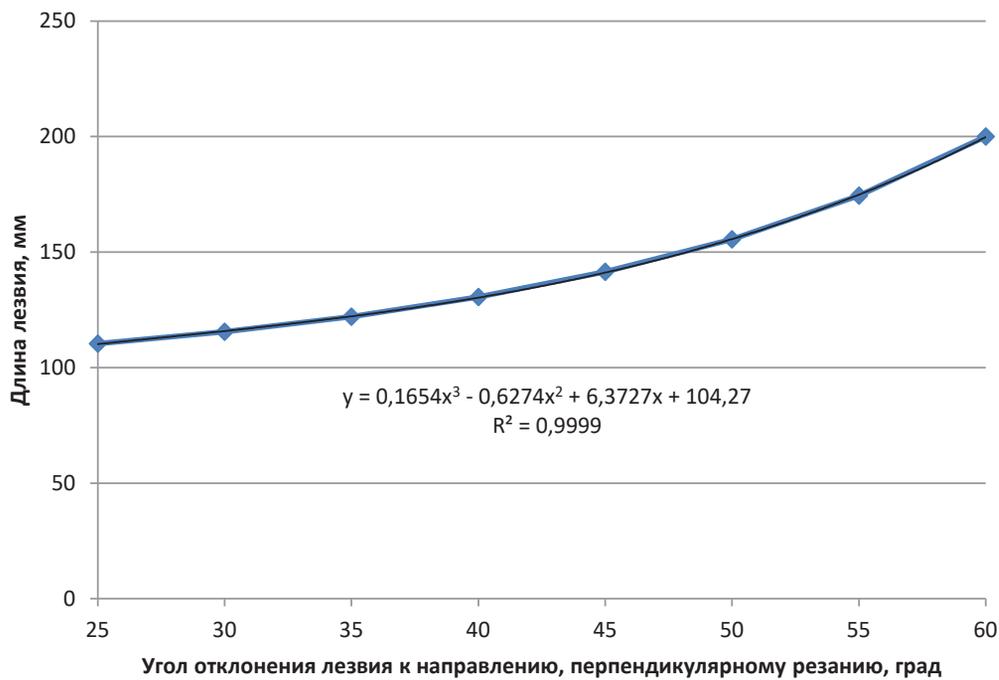


Рисунок 10 – Зависимость длины лезвия от угла отклонения лезвия по отношению к направлению, перпендикулярному резанию. Источник: составлено автором.

Figure 10 – Dependence of the blade length on the angle of deflection of the blade in relation to the direction perpendicular to the cutting. Source: compiled by the authors.

Чем больше угол в плоскости резания по отношению к направлению резания, тем меньше угол заострения лезвия (см. рисунок 7). Поэтому желательно увеличение этого угла. Однако если окружные ножи установить так, что лезвия будут под большим углом в плоскости резания по отношению к направлению резания, их будет необходимо изогнуть. Радиус изгиба окружных ножей зависит от их расположения в роторе, то есть расстояния от оси вращения ротора. Лезвия торцевых ножей должны быть вогнутые также в зависимости от их расположения в роторе. Изгибать окружные ножи и торцевые ножи не технологично. Будет отсутствовать унификация ножей. Поэтому

примем компромиссное конструктивное решение: угол отклонения лезвия в плоскости резания по отношению к направлению резания 30° (рисунок 11), минимально превышающий угол трения грунта о сталь. Предельно малый радиус, на котором может быть расположено лезвие окружного ножа в роторе, в котором угол отклонения лезвия в плоскости резания $\beta = 30^\circ$, 224 мм (см. рисунок 9). Следовательно, окружные ножи, более близкие к оси вращения ротора, не будут осуществлять резания лезвием. По мере приближения к оси вращения ротора резание будет всё более трансформироваться в резание пуансоном, поскольку передний угол $\alpha_0 > 26^\circ$.

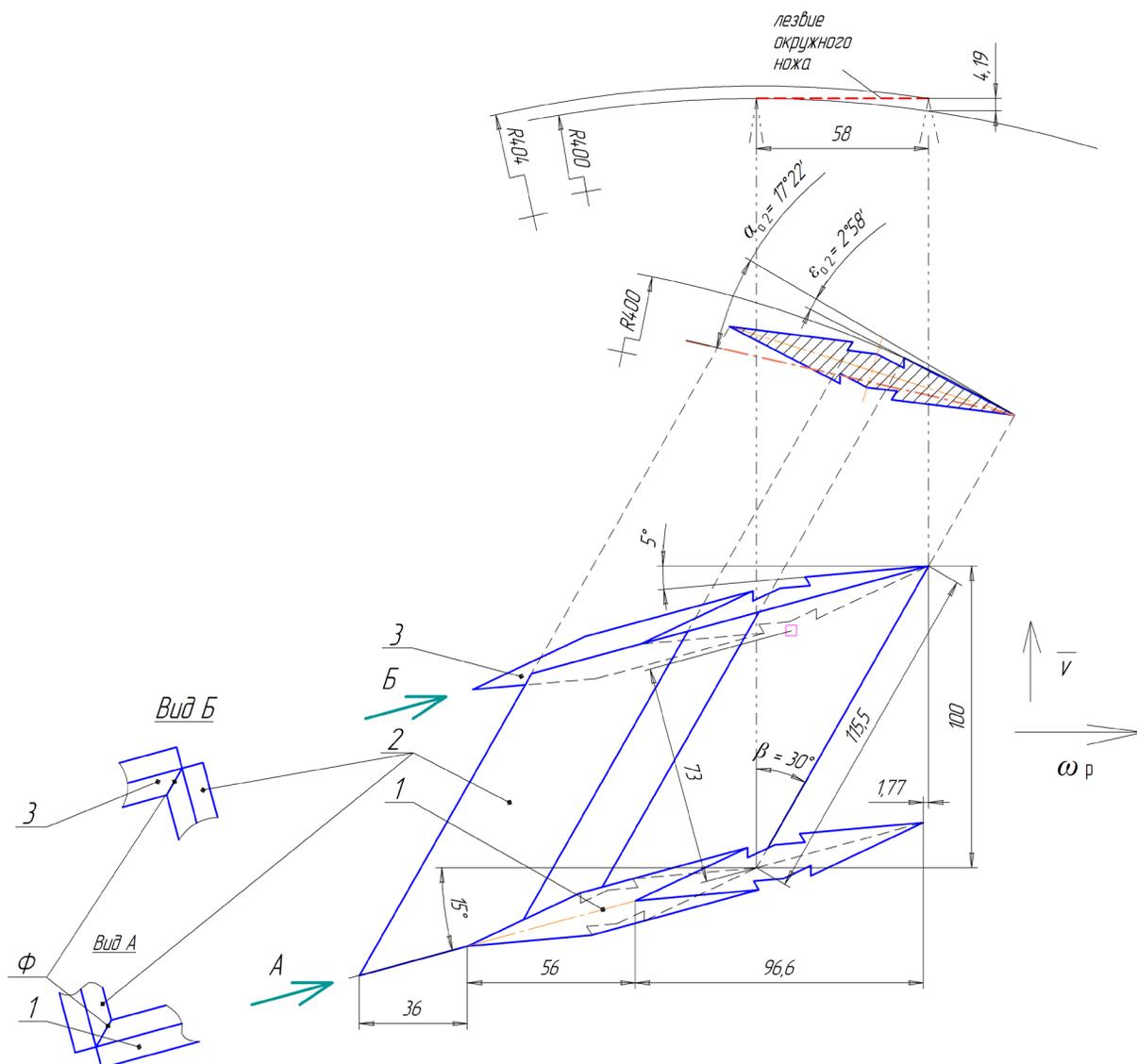


Рисунок 11 – Ножи: 1 – торцевой нож №1; 2 – окружной нож №2; 3 – торцевой нож №2
Источник: составлено автором.

Figure 11 – Knives: 1 – end knife No1; 2 – circular knife No. 2; 3 – end knife No2
Source: compiled by the authors.

Изобразим торцевой нож №1, окружной нож №2 и торцевой нож №2 (см. рисунок 11, внизу) так, будто смотрим на окружной нож №2 сверху.

Направим окружной нож №2 так, чтобы его лезвие было состыковано с лезвием торцевого ножа №1 и направлено под углом 30° к продольно-радиальной плоскости. Продолжив линию лезвия окружного ножа №2 (на рисунке вправо-вверх), изобразим его поперечное сечение, вписанное в дугу радиусом 400 мм. Это радиус точки лезвия торцевого ножа №1, наиболее близкой к оси вращения ротора. Отметим передний угол α_{o_2} с учётом трансформации угла заострения лезвия. Изобразим торцевой нож №1 и торцевой нож №2, примыкающие к окружному ножу №2 (вид А и вид Б) фасками. Торцевой нож №1 примыкает к окружному ножу №2 с одной стороны (на рисунке сверху), а торцевой нож №2 – с другой стороны (на рисунке снизу). Из построения расстояние между торцевым ножом №1 и торцевым ножом №2 73 мм.

Угол 30° наклона лезвия окружных ножей к продольно-радиальной плоскости не учитывает трансформации угла заострения лезвий окружных ножей, связанной с поступательным перемещением агрегата. Так как агрегат перемещается, направление резания окружных ножей не будет расположено в поперечно-радиальной плоскости. Поэтому происходит дополнительная трансформация угла заострения лезвий окружных ножей. Чтобы задние углы торцевых ножей не были меньше $\varepsilon_T = 5^\circ$ (см. рисунок 6), к углу наклона лезвия окружных ножей $\beta = 30^\circ$ можно добавить ещё 5° для учёта трансформации углов заострения лезвий окружных ножей, связанной с поступательным перемещением агрегата. Тогда предельно малый радиус уменьшится от 224 мм до 199 мм (см. рисунок 9): $r_{\text{min}_H} = 199 \text{ мм} \approx 0,2 \text{ м}$. Расположение окружного ножа №4 соответствует этому требованию. Следовательно, в одном ряде большого ротора будут расположены 4 окружных ножа и три торцевых ножа.

Если расстояние от оси вращения ротора до точки ножа будет меньше 199 мм, не будет соблюдено минимальное соотношение окружной скорости точки ножа и поступательной скорости агрегата. Поэтому для выемки грунта вблизи оси вращения ротора прямооточного роторного рыхлителя должен быть соосно установлен малый ротор с большей угловой скоростью.

Угловая скорость большого ротора

$$\omega_p = \frac{v_{\text{окр min}}}{r_i} \quad (3)$$

Так как $v_{\text{окр 1 min}} = v_{\text{Т 1 max}} = 1 \text{ м/с}$, $r_{\text{min}_H} \approx 0,2 \text{ м}$, необходимая угловая скорость большого ротора $\omega_p = 5 \text{ рад/с}$.

Предварительно приняли расположение ножей в роторе в четыре ряда. Но при такой угловой скорости ротора уменьшится толщина слоя грунта, срезаемого ножами. Чрезмерное разрыхление грунта нежелательно в связи с увеличением энергии на этот процесс. Установка ножей в два ряда нерациональна, так как приведёт к увеличению напряжений в приводе вала ротора при изменении локальных сопротивлений грунта. Поэтому примем расположение ножей в три ряда, то есть ряды ножей по окружности развёрнуты под углом 120° друг относительно друга. Количество окружных ножей 12, торцевых ножей – 9. В большом роторе расположен 21 унифицированный нож.

Время одного оборота ротора

$$\tau_1 = \frac{2\pi}{\omega_p}; \quad \tau_1 = 1,256 \text{ с.}$$

Время $1/3$ поворота ротора $\tau_{1/3} = 1,256/3 \approx 0,419 \text{ с}$. Подача на торцевой нож

$$s_{H6} = v_a \tau_{1/3}, \quad (4)$$

где $\tau_{1/3}$ – время $1/3$ поворота ротора. Так как скорость агрегата $v_a = 0,85 \text{ м/с}$ [30], подача на торцевой нож, то есть толщина пласта, срезаемого торцевым ножом, $s_{H6} \approx 0,035 \text{ м}$. Даже с учётом разрыхления грунт будет проходить свободно в пространстве между унифицированными ножами (см. рисунок 11).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путём логических рассуждений, расчётов, построений в плоскости и пространстве определены геометрические и режимные параметры большого ротора прямооточного роторного рыхлителя диаметром 1 м. Установлен предельно малый радиус расположения окружных и торцевых ножей большого ротора. Для выемки грунта вблизи оси вращения ротора прямооточного роторного рыхлителя должен быть соосно установлен малый ротор с большей угловой скоростью. Направление вращения малого ротора должно быть противоположным по отношению к направлению вращения большого ротора для частичной компенсации реактивного момента, создаваемого большим ротором.

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. Т.19, № 4 (86). С. 484–499. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>
2. Зыков Б. И. Теория рабочих процессов строительных машин. Ярославль: Изд. ЯГТУ, 2003. 114 с.
3. Попов Г. Ф. Рабочие органы фрез. М.: Материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. ОНТИ ВИСХОМ, 1970. С. 490–497.
4. Карасёв Г. Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. № 4. С. 36–42.
5. Карнаухов А. И., Орловский С. Н. Определение затрат удельной энергии на процесс резания лесных почв торцевыми фрезами // Строительные и дорожные машины. 2010. № 1. С. 20–22.
6. Кравец И. М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // Строительные и дорожные машины. 2010. № 5. С. 47–49.
7. Кириллов Ф. Ф. Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многолезцовых рабочих органов землеройных машин // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 44–48.
8. Берестов Е. И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 34–38.
9. Баловнев В. И., Нгуен З. Ш. Определение сопротивлений при разработке грунтов рыхлителем по интегральному показателю прочности // Строительные и дорожные машины. 2005. № 3. С. 38–40.
10. Ryabets N., Kurzhner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. P. 115-128.
11. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil // Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 65. P. 421-428.
12. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. // Cold Regions Science and Technology. 2013. Vol. 86. P. 142-166.
13. Li Q. Development of Frozen Soil Model // Advances in Earth Science. 2006. №12. P. 96-103.
14. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007. 448 p.
15. Баловнев В. И., Данилов Р. Г., Улитич О. Ю. Исследование управляемых ножевых систем землеройно-транспортных машин // Строительные и дорожные машины. 2017. № 2. С. 12–15.
16. Нилов В. А., Фёдоров Е. В. Разработка грунта скрепером в условиях свободного резания // Строительные и дорожные машины. 2016. № 2. С. 7–10.
17. Чмиль В. П. Насосно-аккумулятивный привод рыхлителя с автоматическим выбором угла резания // Строительные и дорожные машины. 2016. № 11. С. 18–20.

18. Кабашев Р. А., Тургумбаев С. Д. Экспериментальные исследования процесса копания грунтов роторно-дисковыми рабочими органами под гидростатическим давлением // Вестник СибАДИ. 2016. № 4. С. 23–28.
19. Сёмкин Д. С. О влиянии скорости рабочего органа на силу сопротивления резанию грунта // Вестник СибАДИ. 2017. № 1. С. 37–43.
20. Константинов Ю. В. Методика расчёта сопротивления и момента сопротивления резанию почвы прямым пластинчатым ножом фрезы // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 5. С. 31–39.
21. Сыромятников Ю. Н., Храмов И. С., Войнаш С. А. Гибкий элемент в составе рабочих органов роторной почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 5. С. 32–39.
22. Пархоменко Г. Г., Пархоменко С. Г. Силовой анализ механизмов перемещения рабочих органов почвообрабатывающих машин по заданной траектории // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 1. С. 47–54.
23. Драняев С. Б., Чаткин М. Н., Корявин С. М. Моделирование работы винтового Г-образного ножа почвообрабатывающей фрезы // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 7. С. 13–19.
24. Николаев В. А. Машины для обработки почвы. Теория и расчёт / В. А. Николаев. Ярославль: Изд-во ФГБОУ ВПО ЯГСХА, 2014. 358 с.
25. Николаев В. А. Расчёт скорости прямоходного роторного рыхлителя // Дороги и мосты. Сборник, выпуск 41/1. Москва. 2019 г. С. 35–39.

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. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>
2. Zykov B. I. Teorija rabochih processov stroitel'nyh mashin [Workflow theory of construction machinery]. Ja-roslavl': Izd. JaGTU, 2003. 114 p. (in Russ.)
3. Popov G. F. Rabochie organy frez [Working bodies of the cutters]. Moscow: Materialy NTS VISHOM. Vyp. 27. ONTI VISHOM, 1970: 490-497. (in Russ)
4. Karasjov G. N. Opredelenie sily rezanija grunta s uchjotom uprugih deformacij pri razrushenii [Definition of the cutting force of soil considering elastic deformation at fracture]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2008; 4: 36-42. (in Russ)
5. Karnauhov A. I., Orlovskij S. N. Opredelenie zhatrat udel'noj jenergii na process rezanija lesnyh pochv torcevyimi frezami [Costing of specific energy on the cutting process of forest soils end mills]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 1: 20-22. (in Russ)
6. Kravec I. M. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezanija pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezoj [Determine critical cutting depth when combined cutting soils gidrofrezoj]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 5: 47-49. (in Russ)

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

8. Berestov E. I. Vlijanie trenija grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniju [Influence of friction of soil on the surface of the knife cutting resistance]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 34-38. (in Russ.)

9. Balovnev V. I., Nguen Z. Sh. Opredelenie soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelju prochnosti [Identification of resistances when designing primers Ripper by a combined indicator of strength]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2005; 3: 38-40. (in Russ.)

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

11. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil. *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 65. P. 421-428.

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

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

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

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

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

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

18. Kabashev R. A., Turgumbaev S. D. Jeksperimental'nye issledovanija processa kopanija gruntov rotno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [Experimental studies of the process

of digging soils by rotary-disk working organs under hydrostatic pressure]. *Vestnik SibADI*. 2016; 4: 23-28. (in Russ.)

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

20. Konstantinov Ju. V. Metodika raschjota soprotivlenija i momenta soprotivlenija rezaniju pochvy prjamym plastinchatym nozhom frezy [The method of calculating resistance and the moment of resistance to soil cutting with a straight plate cutter knife]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2019; 5: 31-39. (in Russ.)

21. Syromjatnikov Ju. N., Hramov I. S., Vojnash S. A. Gibkij jelement v sostave rabochih organov rotnoj pochvoobrabatyvajushhej ryhlitel'no-separirujushhej mashiny [Flexible element in the working organs of the rotary soil processing loosening and separating machine]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 5: 32-39. (in Russ.)

22. Parhomenko G. G., Parhomenko S. G. Silovoj analiz mehanizmov peremeshhenija rabochih organov pochvoobrabatyvajushhih mashin po zadannoj traektorii [Power analysis of the mechanisms of movement of working bodies of soil processing machines on a given trajectory]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 1: 47-54. (in Russ.)

23. Dranjaev S. B., Chatkin M. N., Korjavin S. M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvajushhej frezy [Simulation of the work of a screw G-shaped knife soil cutter]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017; 7: 13-19. (in Russ.)

24. Nikolaev V. A. *Mashiny dlja obrabotki pochvy. Teorija i raschjot* [Soil processing machines. Theory and calculation]. Jaroslavl': Izd-vo FGBOU VPO JaG-SHA, 2014: 358. (in Russ.)

25. Nikolaev V. A. *Rezanie grunta passivnymi rabochimi organami*. Teorija i raschjot [Cutting the soil by passive working organs. Theory and Calculation]. Jaroslavl': Izd-vo FGBOU VO JaGTU, 2022: 388. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolayev. Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machinery Department.