

ОРИЕНТИРОВОЧНЫЙ РАСЧЁТ МОЩНОСТИ ЦИКЛИЧЕСКОГО РЕЗАНИЯ ГРУНТА

В.А. Николаев
ФГБОУ ВО ЯТУ,
г. Ярославль, Россия
nikolaev53@inbox.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для циклического резания грунта при формировании подстилающего слоя и откосов автодорог нужны роторные рыхлители. Поэтому общей целью исследования является теоретическое обоснование конструктивных и режимных параметров роторного рыхлителя. Теоретическую оценку затрат энергии на разработку грунта обычно проводят синтезным методом. Используя данный метод, проводят ориентировочный расчёт основных конструктивных параметров и мощности на привод роторного рыхлителя.

Методика исследования. На основании намеченных путей уменьшения затрат энергии на циклическое резание грунта рабочим органом разработана методика ориентировочного расчёта мощности привода ротора. При этом необходимо было выявить изменения эффективных лобовых сечений рабочего органа в процессе оборота ротора путём измерения длины лобового сечения при пошаговом обороте ротора.

Результаты. Определены рациональные параметры рабочего органа циклического резания грунта. Вычислена угловая скорость активного рабочего органа. Выявлен необходимый средний вращающий момент и ориентировочная мощность привода ротора.

Заключение. На основе исследования синтезного метода удалось наметить пути уменьшения затрат энергии на циклическое резание грунта рабочим органом, определить многие конструктивные параметры роторного рыхлителя.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подстилающий слой автодорог, верхний слой грунта, агрегат, роторный рыхлитель, циклическое резание грунта, зажатое резания грунта, затраты энергии, синтезный метод, схема сил, вращающий момент, мощность, ориентировочный расчёт.

© В.А. Николаев



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

APPROXIMATE CALCULATION OF THE CIRCULAR SOIL CUTTING CAPACITY

Vladimir A. Nikolayev

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

nikolaev53@inbox.ru

ABSTRACT

Introduction. Rotary cultivators are necessary for circular soil cutting while forming the underlayment and slopes of highways. Therefore, the objective of the research is a theoretical substantiation of constructive and sensitive parameters for the rotary ripper. The researchers usually use synthesis method to evaluate theoretical evaluation of the energy consumption on the development of soil. The researchers also carry out an indicative calculation of basic design parameters and power drive of rotary ripper.

Materials and methods. The author developed a methodology for calculating the indicative rotor power. Moreover, the author detected changes of the effective frontal sections of the working body in the process of the rotor circulation by means of the length measuring of a frontal section.

Results. As a result, the author defined rational working parameters of circular cutting ground and calculated the angular velocity of the active working body. Moreover, the author also identified the required average torque and approximate rotor power.

Discussion and conclusions. A simple and intuitive method based on accepted formulas of strength of materials, theoretical mechanics and other sciences is required for practical calculations of the working vehicles' bodies. The author finds out that on the basis of the synthesis method the assessing energy expenditure on the development of soil may be defined, the analysis of the interaction with soil working bodies can be made.

KEYWORDS: road base, upper soil layer, aggregate, rotary ripper, circular cutting ground, soil pressing, cutting energy costs, synthesis method, scheme forces, torque, power, indicative calculation.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

- 1) намечены пути уменьшения затрат энергии на циклическое резание грунта;
- 2) определены рациональные параметры рабочего органа;
- 3) вычислена угловая скорость активного рабочего органа;
- 4) выявлен необходимый средний вращающий момент и ориентировочная мощность привода ротора.

© Vladimir A. Nikolayev



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

ВВЕДЕНИЕ

Ввиду большой пространственной разобщённости объектов Российской Федерации проблема быстрого, качественного и дешёвого строительства автодорог очень актуальна. В связи с природно-климатическими условиями строительство дорог ограничено жёсткими временными сроками, за исключением степных областей России. При возведении дорог доля затрат на формирование подстилающего слоя в общих расходах на строительство очень велика. Во-первых, это обусловлено преимущественно холмистым рельефом местности, во-вторых, отсутствием агрегата формирования подстилающего слоя автодорог.

Подстилающий слой обычно формируют, используя имеющийся грунт и грунт из ближайших карьеров. Прежде чем сформировать подстилающий слой нужного профиля следует удалить почву, то есть верхний слой грунта, насыщенный органическими остатками. Для его удаления используют бульдозеры, экскаваторы, скреперы и другие циклические технические средства общего назначения. При их использовании происходит смешение почвы с грунтом, предназначенным для создания подстилающего слоя, что снижает качество автодороги. Органические остатки, содержащиеся в почве и остающиеся в подстилающем слое, с течением времени разлагаются. В местах их разложения дорога оседает, становится неровной, образуются выбоины. Чтобы уменьшить этот недостаток, удаляют с полосы отвода дороги не только почву, но и часть грунта под ней, что существенно увеличивает затраты на строительство. При этом почва с полосы отвода дороги как ценнейший продукт многолетней деятельности природных факторов обычно пропадает, не используется в сельском хозяйстве.

Чтобы автодорога была долговечной при минимально необходимых затратах на её строительство, следует тщательно удалить почву, не затрагивая расположенный под ней грунт. Проблема удешевления строительства авто-

дорог без снижения их качества может быть решена путём создания агрегата формирования подстилающего слоя непрерывного действия, который должен содержать несколько устройств. Важным устройством агрегата является рыхлитель, совершающий циклическое резание почвы, разрушающий её целостность для последующего удаления с полосы отвода автодороги и использования в сельском хозяйстве. Данный рыхлитель можно использовать не только для разрушения слоя почвы, но и для разрыхления грунта с целью формирования откосов дороги.

Циклическое резание грунта бывает пассивным и активным, когда используют фрезу с приводом от вала отбора мощности энергетического средства. Активное резание грунта фрезами пока не получило большого распространения в связи большими затратами энергии в сравнении с пассивным резанием. Однако при формировании подстилающего слоя и откосов автодорог предпочтительным является разрыхление грунта путём его циклического резания активными рабочими органами. Резание грунта при формировании подстилающего слоя и откосов автодорог имеет специфику, связанную с армированностью поверхностного слоя корнями. Поэтому сельскохозяйственные фрезы, применяемые для обработки старопахотной почвы, непригодны для резания грунта, насыщенного корнями. Для циклического резания грунта при формировании подстилающего слоя и откосов автодорог нужны роторные рыхлители, с одной стороны, надёжные, с другой стороны, с умеренными затратами энергии. Поэтому общей целью исследования является теоретическое обоснование конструктивных и режимных параметров роторного рыхлителя для формирования подстилающего слоя и откосов автодорог. В рамках общей цели необходимо провести теоретическое исследование циклического блокированного резания грунта.

Для расчёта параметров резания, теоретической оценки затрат энергии на разработку грунта или обработку почвы синтезным мето-

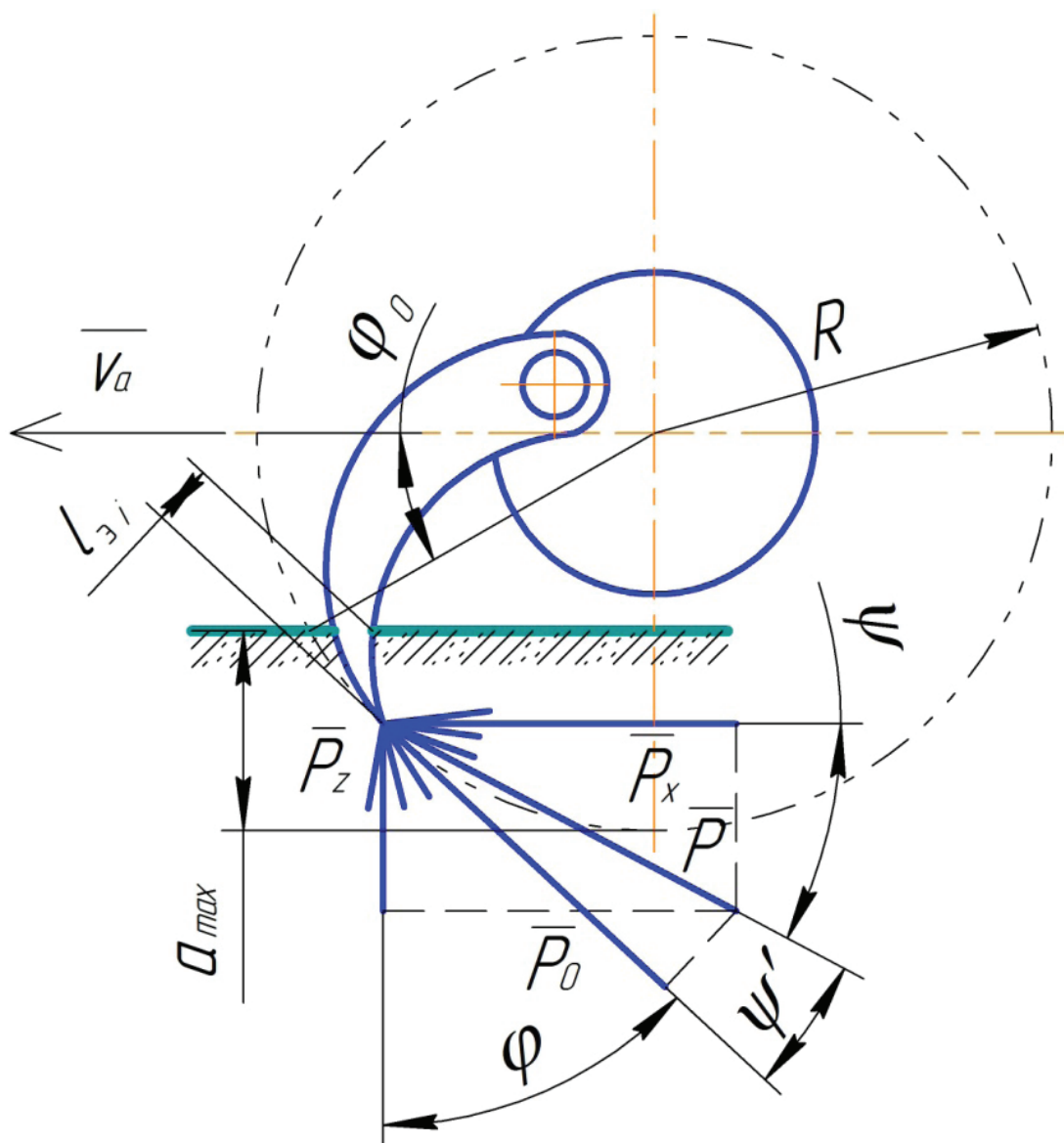


Рисунок 1 – Схема сил, действующих на активный рабочий орган при циклическом резании грунта или почвы:

P – сила сопротивления, R_x – её горизонтальная составляющая,

 R_z – её вертикальная составляющая,

P_0 – проекция силы сопротивления на касательную к траектории носка рабочего органа;

 $a_{\max}$ – глубина резания;

l_{zi} – длина эффективного сечения грунта или почвы, срезаемой активным рабочим органом;

φ – угол отклонения носка активного рабочего органа от горизонтали,

в частности в момент входа его в грунт или почву φ_0 ;

ψ' – угол отклонения проекции силы сопротивления грунта или почвы на касательную

рии носка активного рабочего органа в данной точке

зления грунта или почвы;

v_a – скорость агрегата

Figure 1 – Scheme of forces operating on active working body at cyclic soil cutting:

P – force of resistance,

R_x — horizontal component, R_z — vertical component,

P_0 – resistance force projection to the trajectory of working body;

$a_{\max}$ – cutting depth; l_{ai} – length of effective section of soil which is cut off by active working body;

φ – corner of a deviation of active working body from a horizontal, in particular, at the time of its entrance to soil φ_0 ;

ψ' – corner of the projection deviation of the soil resistance force on a tangent to a trajectory

of active working body from a vector of resistance force of soil:

 v_a – unit speed

дом^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13} [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15] обычно применяют весьма общую схему, показанную на рисунке 1¹⁴.

Активный рабочий орган, совершая вращательное движение с внешним радиусом, производит воздействие на глубину. При этом на его носок действует сила сопротивления грунта. Вектор силы сопротивления грунта можно разложить на горизонтальную и вертикальную составляющие. Проекция силы сопротивления грунта, на касательную к траектории носка рабочего органа, отклонена от вектора силы сопротивления грунта на некоторый угол. Если условно всю силу сопротивления грунта, действующую на активный рабочий орган, сосредоточить на его носке, момент, необходимый для преодоления сопротивления и трения о грунт, в первом приближении составит

$$M = \int_0^{P_{\max}} R dP_0, \text{ или}$$

$$M = nR\sigma_{сж}^e \int_0^{S_{\max}} dS = R\sigma_{сж}^e b \int_0^{a_{\max}} dl_{эi}, \quad (1)$$

где n – количество активных рабочих органов, одновременно находящихся в грунте; $\sigma_{сж}^e$ – предел прочности грунта на сжатие; S – площадь эффективного лобового сечения грунта, перпендикулярного к касательной к носку активного рабочего органа; b – ширина активного рабочего органа; $l_{эi}$ – длина эффективного сечения грунта, срезаемого активным

рабочим органом. Для определения длины эффективного сечения грунта проводят касательную к носку активного рабочего органа в его заданном положении. Параллельно касательной проводят луч из точки касания грунта передней поверхностью активного рабочего органа. Расстояние между касательной и лучом будет являться длиной эффективного сечения грунта (см. рисунок 1). Умножив длину эффективного сечения грунта на ширину активного рабочего органа получим площадь эффективного лобового сечения грунта. Из рисунка 1 можно также определить боковую площадь активного рабочего органа, погружённого в грунт.

Формула справедлива тогда, когда рабочие органы расположены на роторе линейно. Если они расположены в любом другом порядке, то формула имеет вид

$$M = \sum_{i=1}^n R\sigma_{сж}^e b \int_0^{a_{\max}} dl_{эi}. \quad (2)$$

В практических расчётах инерцией ротора пренебрегают¹⁵, поскольку она оказывает большое влияние только в моменты ускорения, остановки и влияет на плавность хода. Пользуясь синтезным методом оценки затрат энергии на разработку грунта, проведём ориентировочный расчёт основных конструктивных параметров и мощности на привод роторного рыхлителя.

¹ Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов. М. : «Высшая школа», 1976. 328 с.

² Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М. : Изд. ЛКИ, 2013. 224 с.

³ Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. М. : Машиностроение, 1975. 424 с.

⁴ Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. М. : Изд. литературы по строительству, 1971. 366 с.

⁵ Зыков Б.И. Теория рабочих процессов строительных машин. Ярославль : Изд. ЯГТУ, 2003. 114 с.

⁶ Ветров Ю.А. Разрушение прочных грунтов. Киев : Изд. «Будивельник», 1973. 350 с.

⁷ Бьюи Х.Д. Механика разрушения: обратные задачи и решения (пер. с английского). М. : Изд. ФИЗМАТЛИТ, 2011. 412 с.

⁸ Партон В.З. Механика разрушения. От теории к практике (пер. с английского). М. : Изд. ЛКИ, 2016. 240 с.

⁹ Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. М. : Машиностроение, 1971. 357 с.

¹⁰ Канарев Ф.М. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия. М. : Машиностроение, 1983. 143 с.

¹¹ Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчёт почвообрабатывающих машин. М. : Машиностроение, 1977. 326 с.

¹² Попов Г.Ф. Рабочие органы фрез. М. : Материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. ОНТИ ВИСХОМ, 1970. С. 490–497.

¹³ Баловнев В.И. Моделирование и прогнозирование процессов взаимодействия машин с многофазными средами: взаимодействие рабочих органов строительных, дорожных и коммунальных машин с грунтом и другими материалами. М. : МАДИ, 2000. 61 с.

¹⁴ Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчёт почвообрабатывающих машин. 326 с.

¹⁵ Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов. М. : «Высшая школа», 1976. 328 с.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из формулы (2), наметим пути уменьшения затрат энергии на циклическое резание грунта рабочим органом¹⁶ [16]:

- применение нешироких плоских рабочих органов долотообразной формы;
- рациональное размещение оптимального количества долот на роторе;
- замена деформации смятия менее энергоёмкой деформацией путём применения рациональной формы долот, наименее возможной их окружной скорости;
- ограничение глубины разработки грунта, уменьшение радиуса ротора.

На основании намеченных путей уменьшения затрат энергии на разработку грунта рассмотрим возможность улучшения параметров активных рабочих органов. Так, отсутствие крепежа для закрепления активных рабочих органов даёт возможность уменьшить диаметр ротора. Вал ротора при работе должен катиться по грунту. В связи с принятой схемой крепления долото является двуединым, то есть содержит два активных рабочих органа. Применение долот сводит к минимуму затраты энергии на разрыв корней растений, подъём грунта над уровнем земли, придание ей кинетической энергии и энергии на преодоление сопротивления воздуха. Учитывая планируемую малую угловую скорость ротора, затраты энергии на подъём грунта над уровнем земли, придание ей кинетической энергии и энергии на преодоление сопротивления воздуха можно в расчёте не принимать во внимание.

Расстояние от центра вала до носка активного рабочего органа

$$R = \frac{d_g}{2} + a_p, \quad (3)$$

где d_g – наружный диаметр трубчатого вала ротора, с защитным кольцом; a_p – глубина разработки грунта ротором.

Соотношение окружной скорости v носка активного рабочего органа и скорости v_a агрегата называют кинематическим параметром¹⁷:

$$\lambda = \frac{v}{v_a}. \quad (4)$$

Угловая скорость вала ротора

$$\omega_p = \frac{v}{R}, \quad (5)$$

где v – окружная скорость носка активного рабочего органа. Из рисунка 1

$$v = \frac{v_a}{\sin \varphi_0}. \quad (6)$$

Допустим, что горизонтальная составляющая окружной скорости носка активного рабочего органа равна скорости агрегата, . Тогда

$$\omega_p = \frac{v_a}{R \sin \varphi_0}. \quad (7)$$

Профиль передних граней, взаимное расположение активных рабочих органов и соотношение поступательной скорости агрегата и окружной скорости носков активных рабочих органов должны быть такими, чтобы перемещение грунта у носков происходило по передней грани, у основания активных рабочих органов – в сторону прохода смежного активного рабочего органа.

Заднюю поверхность получим построением из условия недопустимости заклинивания рабочего органа. В результате построений определим: угол заточки i носка A активного рабочего органа, минимальный передний угол $\alpha_{\min}$ у носка долота, задний угол ε и максимальный передний угол $\alpha_{\max}$ у основания долота. У основания BC должно выполняться условие незащемления грунта между валом и передней поверхностью рабочего органа:

$$90^\circ - \alpha_{\max} < \varphi_{c-\varepsilon}, \quad (8)$$

где $\varphi_{c-\varepsilon}$ – коэффициент трения грунта о сталь, $\varphi_{c-\varepsilon} \approx 26^\circ$.

Для ориентировочного расчёта сил сопротивления грунта и необходимого вращающего момента, руководствуясь формулой 2, следует выявить изменения эффективных лобовых сечений S_i в процессе оборота ротора (рисунок 2). Выявим также изменение боковых площадей S_{bi} активных рабочих органов, погружённых в грунт. Примем шаг поворота вала ротора $11,25^\circ$.

¹⁶ Николаев В.А. Машины для обработки почвы. Теория и расчёт. Ярославль : Изд-во ФГБОУ ВПО ЯГСХА, 2014. 358 с.

¹⁷ Партон В.З. Механика разрушения. От теории к практике (пер. с английского). М. : Изд. ЛКИ, 2016. 240 с.

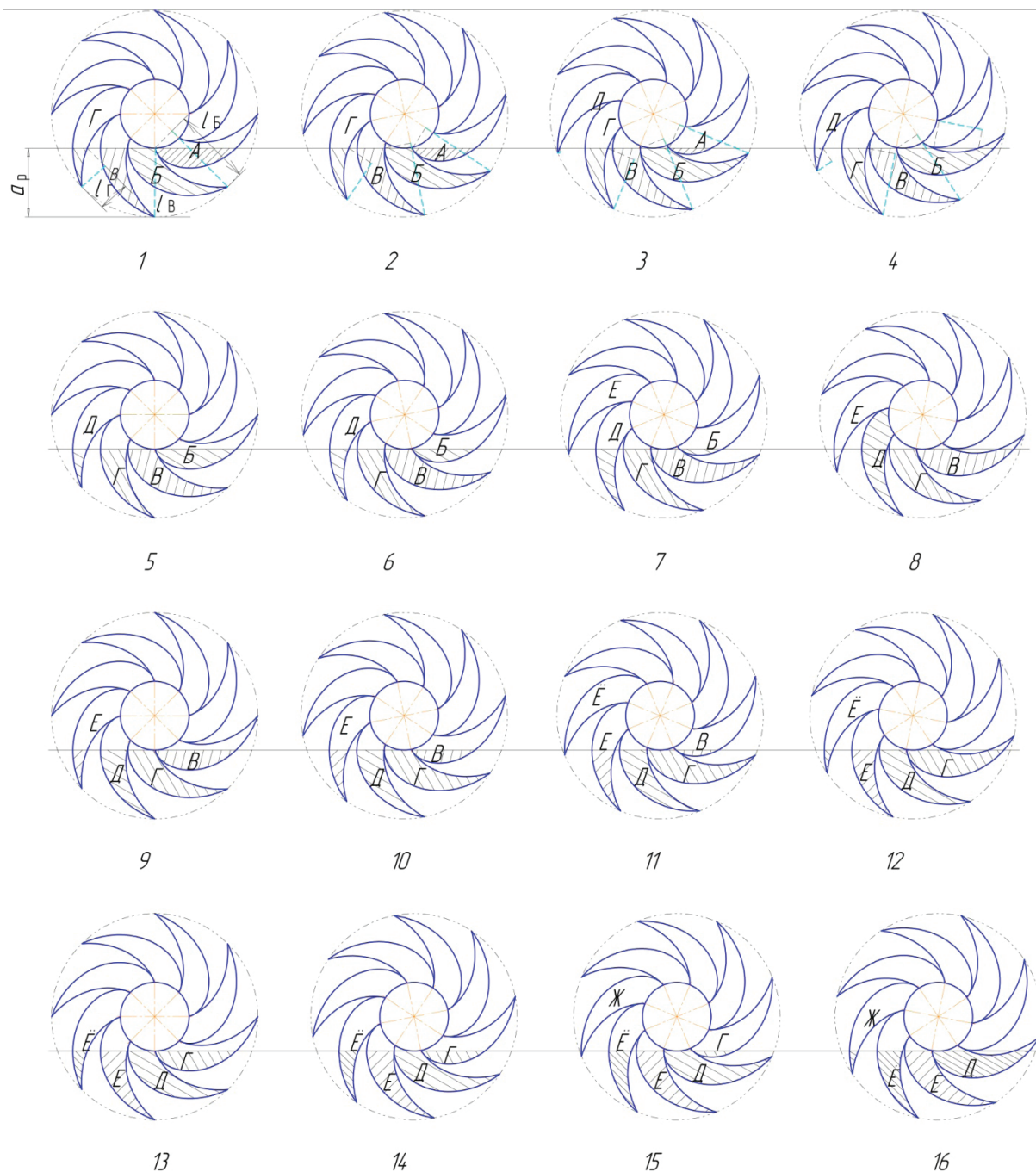


Рисунок 2 – Схема погружения активных рабочих органов в грунт

Figure 2 – Scheme of the active working bodies' immersion to the soil

Эффективное лобовое сечение S_i активного рабочего органа равно произведению его ширины b на длину эффективного сечения грунта, срезаемого активным рабочим органом, l_{zi} (см. рисунок 2, поз. 1)

$$S_i = bl_{zi}. \quad (9)$$

Общая площадь эффективных лобовых сечений

$$S_g = b \sum l_{zi}. \quad (10)$$

По полученным данным (таблица 1) определим изменение суммарной силы сопротивления грунта вращению ротора (таблица 2) и

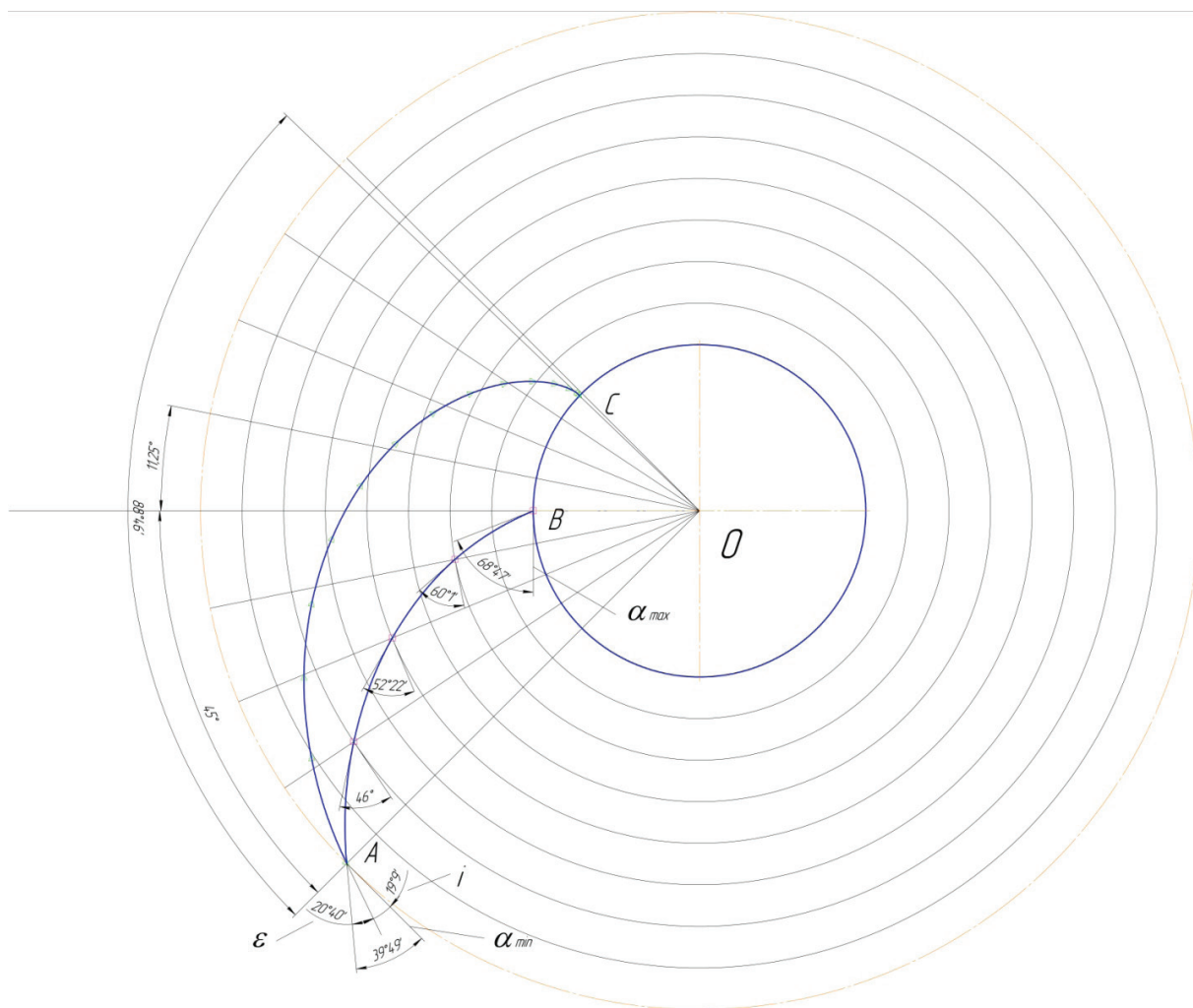


Рисунок 3 – Профиль активного рабочего органа

Figure 3 – Active working body profile

изменение необходимого вращающего момента, необходимый средний вращающий момент $T_{ср}$ для привода ротора. Ориентировочную мощность привода ротора рассчитаем по формуле

$$N = T_{ср} \omega_p, \quad (11)$$

где ω_p – угловая скорость ротора.

Вычисленные параметры ротора можно применять для ориентировочного расчёта роторного рыхлителя. Для её точного расчёта необходимо рассмотреть более тщательно резание грунта активным рабочим органом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Из возможных вариантов развёртывания передней поверхности активного рабочего органа целесообразно выбрать спираль Архимеда с соотношением $\rho = 200\varphi$ ¹⁸ [16]. Это соотношение соответствует задаче обеспечения надёжности при достаточной прочности активного рабочего органа.

На рисунке 3 показан профиль активного рабочего органа. Частица грунта от воздействия активного рабочего органа будет сначала перемещаться по его передней поверхности от носка к основанию, а у основания сместится с передней поверхности активного рабочего органа в сторону.

¹⁸ Николаев В.А. Машины для обработки почвы. Теория и расчёт. Ярославль : Изд-во ФГБОУ ВПО ЯГСХА, 2014. 358 с.

Долото представляет двухконсольную балку, установленную в трубчатом вале. Критическое сечение активного рабочего органа расположено у его основания ВС. Толщина долота должна быть достаточной для обеспечения его прочности. Долото работает на изгиб, но частично сопротивление грунта создаст радиальное давление на вал. Глубина разработки грунта должна быть минимально необходимой для экономии энергии и соблюдения прочности рабочих органов. Так как глубина почвенного горизонта необработанных участков обычно от 150 до 200 мм, примем для расчёта $a_p = 160$ мм. Если необходима разработка грунта на большую глубину, можно использовать сменные рабочие органы. Учитывая, что у сталей среднее соотношение допускаемых напряжений смятия и изгиба $[\sigma_{см}] \approx 1,3[\sigma_{из}]$, получаем толщину долота $b = 12$ мм на рабочем участке, b_e на участке внутри вала, наружный $d_e = 160$ мм и внутренний диаметр вала. Лобовой профиль активного рабочего

органа незаострённый. Носок и кромки лобовых граней активного рабочего органа следует выполнять с износостойким покрытием. Рабочие органы в роторе относительно друг друга развернём по спирали. Руководствуясь этими ограничениями, примем угол развёртывания между соседними долотами по спирали $\beta = 45^\circ$ (рисунок 4). Отсюда количество долот в одном обороте спирали 8.

Расстояние от центра вала до носка активного рабочего органа формула (3) $R = 240$ мм. Расстояние между смежными долотами связано также с углом их развёртывания по спирали на вале. Минимальное расстояние между смежными долотами ограничено конструктивными параметрами держателей долот, сваренных внутри вала, прочностными требованиями к валу и мощностью, потребляемой рыхлителем. Максимальное расстояние между ними должно быть таким, чтобы была качественная разработка грунта. Исходя из этих условий получим расстояние

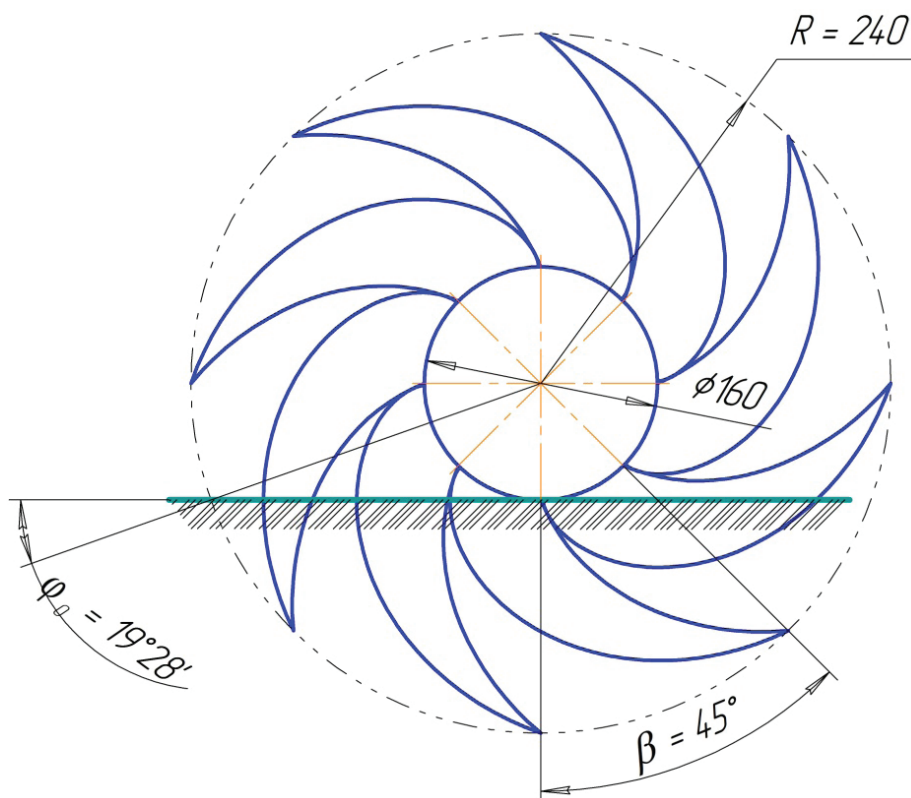


Рисунок 4 – Схема расположения активных рабочих органов в роторе

Figure 4 – Layout of active working bodies in a rotor

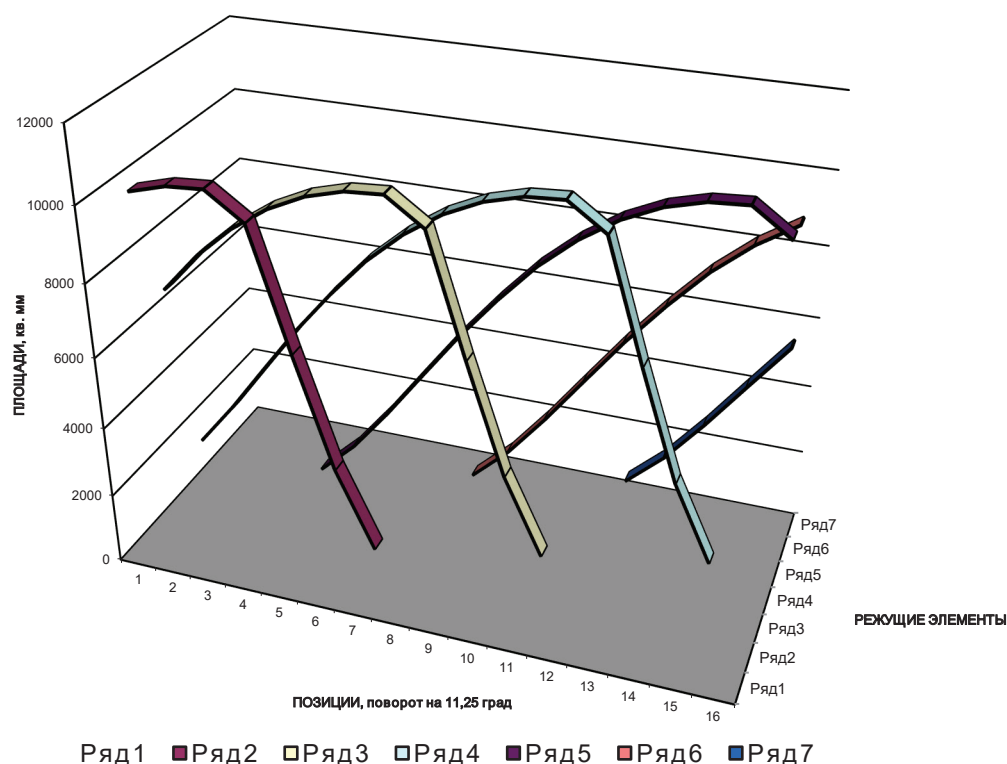


Рисунок 5 – Изменение боковых площадей S_{6i} отдельных активных рабочих органов группы, погружённых в грунт

Figure 5 – Change of the S_{6i} side areas of separate active group working bodies on soil

$b_{м\partial} = 100$ мм между смежными активными рабочими органами.

Примем ширину захвата роторного рыхлителя $B = 10$ м. Так как рабочие органы расположены в вале ротора на расстоянии $b_{м\partial} = 0,1$ м, количество долот в обороте спирали 8, общее количество долот на вале ротора 100 шт, а количество витков спирали, по которой развёрнуты рабочие органы, 12,5. Грунт – тяжёлые суглинки, армированные корнями, с удельным сопротивлением $k = 0,9$ МПа. Исходя из конструктивной компоновки ротора рыхлителя и минимальных затрат энергии на разработку грунта, установим скорость агрегата $v_a = 0,085$ м/с и минимальный кинематический параметр $\lambda = 3^{19}$. Из рисунка 4 угол $\varphi_0 = 19,47^\circ$. Отсюда расчётная угловая скорость вала ротора формула (7)

$$\omega_p = \frac{v_a}{0,24 \cdot \sin 19,47^\circ} = 12,5v_a \approx 1,07 \text{ рад/с.}$$

Выявим изменения боковых площадей отдельных активных рабочих органов, погружённых в грунт (рисунок 5). Расчёт площадей эффективных лобовых сечений активных рабочих органов, погружённых в грунт, при обороте ротора дан в таблице 1.

По полученным данным определим изменение суммарной силы сопротивления грунта вращению ротора и изменение необходимого вращающего момента (таблица 2).

Если сила воздействия активного рабочего органа приложена к его носку (см. рисунок 1), то необходимый средний вращающий момент $T_{cp} = 14750$ Нм. Ориентировочная мощность привода ротора формула (11)

$$N = 14750 \cdot 1,07 \approx 15782 \text{ Вт} \approx 15,8 \text{ кВт.}$$

¹⁹Партон В.3. Механика разрушения. От теории к практике (пер. с английского). М. : Изд. ЛКИ, 2016. 240 с.

Таблица 1
Длины и площади эффективных лобовых сечений активных рабочих органов,
погружённых в грунт, при обороте ротора

Table 1
Lengths and areas of effective front sections of active working bodies on soil by rotor turn

Длины эффективных сечений, мм							Общая длина	Ширина долота	Площадь сечения
Б	В	Г	Д	Е	Ё	Ж	мм	мм	кв. мм
183	160	73					416	12	4992
181	170	102					453	12	5436
173	177	125	8				483	12	5796
102	181	146	40				469	12	5628
	183	160	73				416	12	4992
	181	170	102				453	12	5436
	173	177	125	8			483	12	5796
	102	181	146	40			469	12	5628
		183	160	73			416	12	4992
		181	170	102			453	12	5436
		173	177	125	8		483	12	5796
		102	181	146	40		469	12	5628
			183	160	73		416	12	4992
			181	170	102		453	12	5436
			173	177	125	8	483	12	5796
			102	181	146	40	469	12	5628
			183	160	73		416	12	4992
			181	170	102		453	12	5436
			173	177	125	8	483	12	5796
			102	181	146	40	469	12	5628

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе синтезного метода удалось наметить пути уменьшения затрат энергии на циклическое резание грунта рабочим органом, определить многие конструктивные параметры роторного рыхлителя, произвести ориентировочный расчёт сил взаимодействия рабочего органа с грунтом, определить средний необходимый вращающий момент и мощность привода ротора. Для полной реализации цели исследования необходимо после расчётов параметров на основе синтезного метода произвести анализ взаимодействия рабочих органов с грунтом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Карасёв Г.Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. № 4. С. 36–42.

3. 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.

4. Кравец И.М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // Строительные и дорожные машины. 2010. № 5. С. 47–49.

5. 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.

6. Берестов Е.И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // Строительные и дорожные машины, 2010. № 11. С. 34–38.

7. Вершинин А.В., Зубов В.С., Тюльнев А.М. Повышение эффективности дискофрезерных рабочих механизмов для разработки мёрзлых грунтов // Строительные и дорожные машины. 2012. № 8. С. 42–44.

8. Баловнев В.И., Нгуен З.Ш. Определение сопротивлений при разработке грунтов рыхлителем по интегральному показателю проч-

Таблица 2
Сопротивление грунта и необходимый вращающий момент для привода ротора

Table 2
Resistance of soil and necessary rotating moment for the rotor drive

Площадь лобового сечения	Удельное сопротивление	Сопротивление грунта одной развёртке	Кол-во развёрток рабочих органов	Общее сопротивление грунта	Максимальное плечо	Максимальный вращающий момент
кв. мм	МПа	Н		Н	м	Нм
4992	0,9	4492,8	12,5	56160	0,24	13478,4
5436	0,9	4892,4	12,5	61155	0,24	14677,2
5796	0,9	5216,4	12,5	65205	0,24	15649,2
5628	0,9	5065,2	12,5	63315	0,24	15195,6
4992	0,9	4492,8	12,5	56160	0,24	13478,4
5436	0,9	4892,4	12,5	61155	0,24	14677,2
5796	0,9	5216,4	12,5	65205	0,24	15649,2
5628	0,9	5065,2	12,5	63315	0,24	15195,6
4992	0,9	4492,8	12,5	56160	0,24	13478,4
5436	0,9	4892,4	12,5	61155	0,24	14677,2
5796	0,9	5216,4	12,5	65205	0,24	15649,2
5628	0,9	5065,2	12,5	63315	0,24	15195,6
4992	0,9	4492,8	12,5	56160	0,24	13478,4
5436	0,9	4892,4	12,5	61155	0,24	14677,2
5796	0,9	5216,4	12,5	65205	0,24	15649,2
5628	0,9	5065,2	12,5	63315	0,24	15195,6
	Средний максимальный вращающий момент					14750,1

ности // Строительные и дорожные машины. 2005. №3. С. 38–40.

9. Завьялов А.М., Завьялов М.А., Кузнецова В.Н., Мещеряков В.А. Математическое моделирование рабочих процессов дорожных и строительных машин: имитационные и адаптивные модели : Монография. Омск: СибАДИ, 2012. 411 с.

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

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

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

13. Sun X. ACT-timely experimental study

on meso-scopic damage development of frozen soil under triaxial shearing. // Rock and Soil Mechanics. 2005. №8. P. 150-163.

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

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

16. Николаев В.А., Капралов В.В., Гумённый В.В. Пути уменьшения затрат энергии на работу рыхлителя устройства формирования подстилающего слоя автодорог // Вестник Ярославского высшего военного училища, 2018. №1. С. 165–170.

REFERENCES

1. Zhuk A.F. Teoreticheskoe obosnovanie racional'noj tehnologicheskoy shemy i parametrov rotacionnogo pluga. Sbornik nauchnyh trudov «Teorija i raschjot pochvoobrabatyvajushhih

mashin» [Theoretical substantiation of rational technological scheme and parameters of Rotary plow. Collection of scientific works "theory and calculation of tillage machines." T 120]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1989: 145–153 (in Russian).

2. Karasyev G.N. Opredelenie sily rezaniya 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 Russian).

3. Karnaukhov A.I., Orlovskiy S.N. Opredelenie zatrat udel'noj jenergii na process rezaniya lesnykh 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 Russian).

4. Kravets I.M. Opredelenie kriticheskoy glubiny rezaniya pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezo [Determine critical cutting depth when combined cutting soils gidrofrezoj]. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2010; 5: 47–49 (in Russian).

5. Kirillov F.F. Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tjagovogo usiliya dlja mnogorezcovykh rabochih organov zemlerojnykh mashin [Deterministic mathematical model of the temporal distribution of traction for working bodies of earthmoving machines]. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2010; 11: 44–48 (in Russian).

6. Berestov E.I. Vlijanie treniya grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniyu [Influence of the soil friction on the surface of the knife cutting resistance]. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2010; 11: 34–38 (in Russian).

7. Vershinin A.V., Subov V.S., Tyulnev A.M. Povyshenie jeffektivnosti diskofrezemykh rabochih mehanizmov dlja razrabotki mjorzlykh gruntov [Improving the efficiency of the working mechanisms for the development of frozen soil]. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2012; 8: 42–44 (in Russian).

8. 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 Russian).

9. Zavyalov A.M., Zavyalov M.A., Kuznetsova V.N., Mezherjakov V.A. Mathematical modeling

of workflows, road and construction machines: simulation and adaptive models. Omsk, SibADI, 2012. 411 p. (in Russian).

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

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

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

13. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scopic damage development of frozen soil under triaxial shearing. Rock and Soil Mechanics. 2005; 8: 150–163.

14. Li Q. Development of Frozen Soil Model. Advances in Earth Science. 2006; 12: 96–103.

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

16. Nikolayev V.A., Kapralov V.V., Gumeny V.V. Ways to reduce energy consumption at work underlying layer forming device incorporated highways. Vestnik Jaroslavskogo vysshego voennogo uchilishha. 2018; 1: 165–170 (in Russian).

Поступила 26.03.2019, принята к публикации 21.06.2019.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГОУ ВО Ярославский технический университет (г. Ярославль, Московский пр., 88. e-mail: Nikolaev53@inbox.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolaev – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Construction and Road Machines Department, Yaroslavl Technical University (Yaroslavl, 88, Moskovsky Ave., e-mail: Nikolaev53@inbox.ru).