

АНАЛИЗ ЦИКЛИЧЕСКОГО РЕЗАНИЯ ГРУНТА

В.А. Николаев
ФГБОУ ВО ЯТУ,
г. Ярославль, Россия

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. Используя синтезный метод, можно получить лишь ориентировочные результаты. Для более точного расчёта параметров резания грунта необходимо произвести анализ взаимодействия рабочих органов с грунтом.

Методика исследования. На основании намеченных путей уменьшения затрат энергии на циклическое резание грунта рабочим органом разработана методика расчёта: силы резания грунта носком рабочего органа; силы, необходимой для первичного сдвига грунта передней поверхностью рабочего органа; суммарной силы смещения грунта активным рабочим органом; силы трения боковых поверхностей рабочего органа о грунт в процессе оборота ротора.

Результаты. Используя разработанную методику определения параметров циклического резания грунта, вычислены их конкретные значения в процессе оборота ротора, исходя из принятых исходных данных. На основе расчётов построены и аппроксимированы графики зависимостей параметров резания грунта от угла поворота ротора. В частности, получены зависимости: силы, необходимой для сдвига грунта активным рабочим органом; массы смещаемого грунта; ускорения смещаемого грунта; силы, необходимой для придания ускорения смещаемому грунту; силы воздействия грунта на боковую поверхность смещаемого грунтового клина; силы трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта; суммарной силы смещения грунта активным рабочим органом от угла поворота ротора при движении агрегата на различных передачах II диапазона трактора ХТЗ-17221.

Заключение. На основе анализа взаимодействия рабочих органов с грунтом разработана методика расчёта сил, возникающих при резании грунта, и вычислены их конкретные значения. Зная эти силы и точки их приложений, несложно определить необходимый вращающий момент и мощность привода ротора, если все рабочие органы осуществляют зажатое резание.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подстилающий слой автодорог, роторный рыхлитель, циклическое резание грунта, зажатое резание грунта, активный рабочий орган, анализ взаимодействия с грунтом, сила резания носком, первичный сдвиг грунта, смещение грунта, трение о грунт.

Поступила 07.09.2019, принята к публикации 17.12.2019.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Николаев В.А. Анализ циклического резания грунта. Вестник СибАДИ. 2019;16(6): 642–657. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657>

© Николаев В.А.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI:<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657>

ANALYSIS OF THE CYCLICAL GROUND CUTTING

Vladimir A. Nikolayev
Yaroslavl Technical University,
Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

Introduction. Rotary rippers are needed for cyclical cutting of the ground when the underlying layer and slopes of the roads are formed. Therefore, the general purpose of the research is the theoretical justification of the design and mode of rotary ripper's parameters. Using the synthesis method, researches get only indicative results. In order to calculate the parameters of ground cutting, it is necessary to analyze the interaction of working bodies with the ground.

Materials and methods. Based on the planned ways to reduce the cost of energy for cyclical cutting of the ground, the author developed the calculation method of the working body: the force of cutting the ground with the toe of the working body; the force necessary for the primary shift of the ground by the front surface of the working body; the total force of ground displacement by an active working body; the friction of the side surfaces of the working body on the ground during the rotation.

Results. The author calculated the specific values in the process of rotation by using the developed method of determining the parameters of the cyclic ground cutting and basing on the accepted data. Moreover, the author constructed and approximated the graphs' dependencies of ground cutting parameters of the rotor angle. In particular, there were dependencies: the force required to shift the ground by an active working body, the mass of the displaced ground, the acceleration of the displaced ground, the force needed to accelerate the displaced soil, the force of the ground's impact on the side surface of the displaced ground wedge, the friction force displaced by the active working body of the ground wedge on the array of soil, the total force of the displacement of the ground by the active working body from the angle of the rotor when moving the unit at various transmissions II range of tractor HTP-17221.

Discussion and conclusions. The method of calculating the forces of the ground cutting and calculating their specific values helps to determine the required rotational moment and power of the rotor drive.

KEYWORDS: underlying layer of roads, rotary ripper, cyclical cutting of the ground, clamped cutting of the ground, active working body, ground interaction analysis, cutting tool force, primary shift of the ground, ground displacement, ground friction.

Submitted 07.09.2019, revised 17.12.2019.

The author has read and approved the final manuscript.

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

For citation: Nikolayev Vladimir A. Analysis of the cyclical ground cutting. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6): 642–657 (in Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657>

© Nikolayev V.A.



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1) выявлены частные силы воздействия рабочего органа на грунт при циклическом резании;

2) вычислена сила резания грунта носком рабочего органа;

3) определено изменение силы, необходимой для первичного сдвига грунта передней поверхностью рабочего органа от угла поворота ротора;

4) выявлено изменение суммарной силы смещения грунта активным рабочим органом при повороте ротора.

ВВЕДЕНИЕ

Доля затрат на формирование подстилающего слоя в общих затратах на строительство очень велика. Прежде чем сформировать подстилающий слой нужного профиля следует удалить почву, то есть верхний слой грунта, насыщенный органическими остатками. Для его удаления применяют 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, которые остаются 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.

Проблема удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания агрегата формирования подстилающего слоя непрерывного действия. Одним из устройств агрегата должен являться рыхлитель, совершающий циклическое резание верхнего слоя грунта, разрушающий его целостность для последующего удаления с полосы отвода автодороги и использования в сельском хозяйстве. Рыхлитель, совершающий циклическое резание грунта, можно использовать не только для разрушения слоя почвы, но и для разрыхления грунта с целью формирования откосов дорог.

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. 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. 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 резания грунта.

Для теоретической оценки затрат энергии на разработку грунта, в том числе талого грунта, обычно используют синтезный метод^{1,2,3,4,5,6,7,8,9} [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Однако оценка затрат энергии на разработку грунта активными рабочими органами син-

¹ Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М. : Изд. ЛКИ, 2013. 224 с.

² Зыков Б.И. Теория рабочих процессов строительных машин. Ярославль : Изд. ЯГТУ, 2003. 114 с.

³ Ветров Ю.А. Разрушение прочных грунтов. Киев: Изд. «Будивельник», 1973. 350 с.

⁴ Бьюи Х.Д. Механика разрушения: обратные задачи и решения (пер. с английского). М. : Изд. ФИЗМАТЛИТ, 2011. 412 с.

⁵ Партон В.З. Механика разрушения. От теории к практике (пер. с английского). М. : Изд. ЛКИ, 2016. 240 с.

⁶ Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. М. : Машиностроение, 1971. 357 с.

⁷ Канарев Ф.М. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия. М. : Машиностроение, 1983. 143 с.

⁸ Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчёт почвообрабатывающих машин. М. : Машиностроение, 1977. 326 с.

⁹ 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.

тезным методом [25, 26] даёт лишь ориентировочные результаты. Для более точного расчёта параметров резания грунта необходимо произвести анализ взаимодействия рабочих органов с грунтом.

В статье [26] намечены пути уменьшения затрат энергии на циклическое резание грунта рабочим органом. В частности, отсутствие крепежа для закрепления активных рабочих органов на вале ротора, применение двуединого

долотообразного рабочего органа, применение рациональной формы долот, рациональное размещение оптимального количества долот на роторе, ограничение глубины разработки грунта и угловой скорости вала ротора. Рассмотрим внедрение активного рабочего органа в грунт (рисунок 1, а) и его траекторию в грунте при расчётной ограниченной глубине разработки 160 мм.

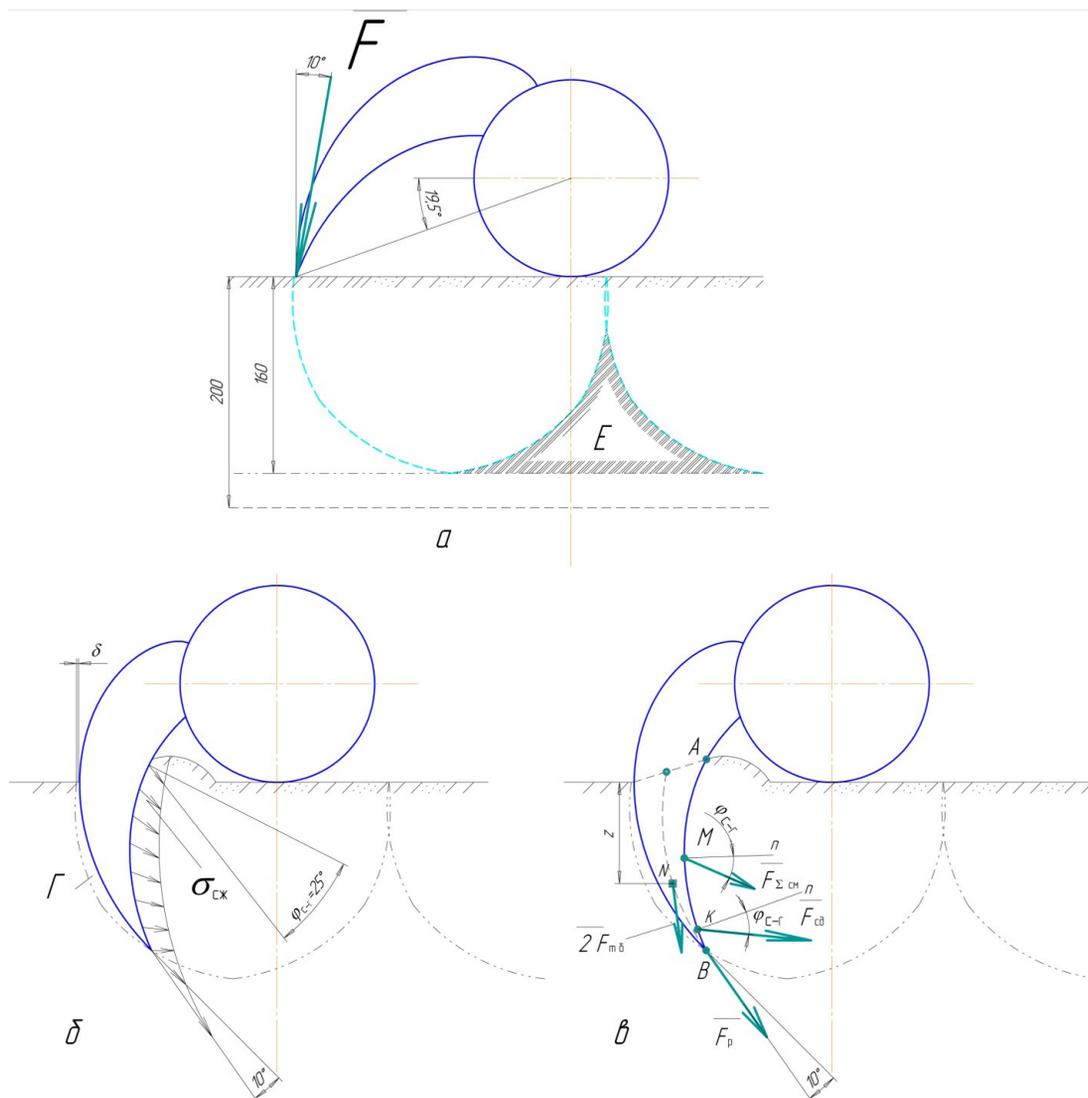


Рисунок 1 – Воздействие активного рабочего органа на грунт силой F при зажатом резании: а – момент входа в грунт и траектория, E – остающаяся перемычка; б – распределённая сила, создающая напряжение сжатия, G – свободное пространство; в – сосредоточенные силы: F_p – сила резания, F_{sd} – сила первичного сдвига грунта, F_{cm} – сила, необходимая для смещения сдвинутого грунта, $2F_{m\delta}$ – сила трения боковых плоскостей активного рабочего органа о грунт; z – расстояние от поверхности грунта до точки её приложения; φ_{c-z} – угол трения стали о грунт

Figure 1 – Exposure to the ground by Force F when cut is clamped: а – the moment of entry into the ground and the trajectory, E – the remaining jumper; б – distributed force, creating a compression voltage, G – free space; в – Concentrated forces: F_r – cutting force, F_{sd} – the force of the primary shift of the ground, F_{cm} – the force necessary to shift the shifted ground, $2F_{m\delta}$ – the force of friction of the side planes of the active working body on the ground; z – the distance from the ground surface to the point of its application; φ_{c-z} – angle of friction has become about the ground

Из рисунка 1, а видно, что в момент входа в грунт носка рабочего органа сила воздействия активного рабочего органа на грунт направлена по биссектрисе угла заточки. Если геометрические параметры носка активного рабочего органа соответствуют параметрам, рассчитанным в [26], он врезается в грунт так, что касательная к его задней поверхности направлена почти вертикально. Активный рабочий орган углубляется, сдвигая грунт передней поверхностью. При дальнейшем продвижении (рисунок 1, б) задняя поверхность активного рабочего органа входит в почву с небольшим зазором δ , исключая её трение о грунт. При минимально необходимой угловой скорости вала ротора между рассматриваемым проходом и проходом предыдущего активного рабочего органа остаётся неразработанный участок грунта, перемычка E (см. рисунок 1, а). Поэтому перечисленных конструктивных и режимных мер уменьшения затрат энергии на циклическое резание грунта рабочим органом недостаточно. Чтобы эти перемычки срезать, сделать ровной поверхность подстилающего слоя автодороги, установим дополнительно пассивные рабочие органы с расчётной глубиной хода 200 мм. Путём анализа взаимодействия рабочих органов с грунтом вычислим параметры роторного рыхлителя.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Из построений определим общую площадь, описываемую траекторией активного рабочего органа в грунте, и путь его носка в грунте. Приложенная к активному рабочему органу сила создаёт поверхностные распределённые силы (см. рисунок 1, б), порождающие в грунте напряжения сжатия. Заменяем распределённые силы воздействия активного рабочего органа на грунт сосредоточенными силами (рисунок 1, в).

Сила F_p резания приложена к носку В активного рабочего органа. Она направлена по биссектрисе угла заточки. Сила F_{cd} совершает первичный сдвиг грунта, приложена к некоторой точке K на передней поверхности активного рабочего органа, положение которой определим из дальнейших построений. Она отклонена от нормали n к передней поверхности активного рабочего органа в точке K на угол трения грунта о сталь $\varphi_{с-г}$. Сила $F_{\Sigma см}$ смещает сдвинутый грунт, приложена к некоторой точке M передней поверхности и также отклонена от нормали к передней поверхности активного рабочего органа в точке M на угол трения грунта о сталь.

Силы трения боковых плоскостей приложены к точкам N участков плоскостей активного рабочего органа, погружённых в грунт. На плоском рисунке эти силы можно изобразить одним вектором $2F_{mб}$, поскольку они равны при зажатом резании, то есть резании, когда лезвие зажато грунтом с обеих сторон [25]. Точку N приложения силы трения расположим на глубине $2/3$ заглубления активного рабочего органа, а направление в каждом рассматриваемом положении будем определять путём перемещения этой точки в предыдущее положение. С достаточной точностью можно заменить криволинейную траекторию точки N , при перемещении из предыдущего положения в рассматриваемое положение, на прямолинейную траекторию ввиду малой величины используемого шага вычислений.

Чтобы определить силу резания расчётным путём, представим, что активный рабочий орган разделяет грунт микроотрывами [25], а один микроотрыв грунта при внедрении активного рабочего органа происходит на пути 18 мм. Площадь отрыва S_o равна произведению пути микроотрыва l_o на удвоенную ширину $2b$ активного рабочего органа с учётом распространения трещины вглубь массива грунта

$$S_o = 2bl_o. \quad (1)$$

Приняв предел прочности грунта на растяжение, определим силу резания

$$F_p = \sigma_p^e S_o. \quad (2)$$

Активный рабочий орган сдвигает грунт по двум боковым плоскостям и нижней плоскости. Сила сдвига

$$F_{cd} = \tau_{cd}^e S_{cd}, \quad (3)$$

где τ_{cd}^e – предел прочности грунта на сдвиг; S_{cd} – площадь сдвигаемого грунта.

Сила сдвига грунта при зажатом резании активным рабочим органом изменяется. Для определения её текущих значений следует выполнить построения, задав шаг вычислений, соответствующий углу поворота вала ротора $11,25^\circ$. На рисунке 2, б активный рабочий орган изображён в положении 2.

Сделаем несколько допущений:

- свойства грунта в пределах зоны резания одинаковые, без учёта включений;
- участок сдвига грунта сверху и снизу на рисунке 2 ограничен элементарными векторами, отклонёнными в соответствующих точ-

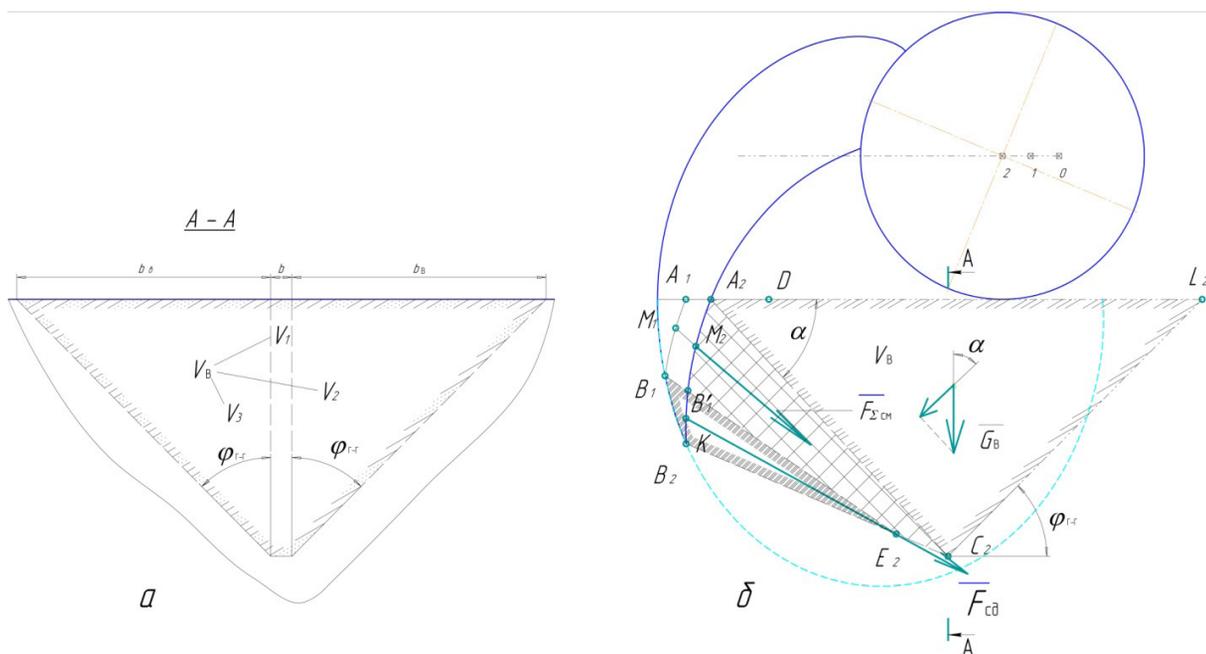


Рисунок 2 – Зона воздействия активного рабочего органа: а – разрез А – А; V_1, V_2, V_3 – составляющие объёма вытесняемого грунта V_g ; φ_{a-a} – угол трения грунта о грунт; b – ширина рабочего органа; δ – сечение сдвигаемого $B_1B_2E_2$, смещаемого $A_2B'_1E_2C_2$ и вытесняемого $A_2C_2L_2$ грунта; F_{cd} – сила первичного сдвига грунта, $F_{c\delta}$ – сила первичного сдвига грунта, $F_{\Sigma CM}$ – сила, необходимая для смещения; G_g – сила тяжести вытесняемого грунта

Figure 2 – active working body impact area: а – cut А – А; V_1, V_2, V_3 – the volume of the displaced soil V_g ; $(g-g)$ – the angle of ground friction on the ground; b – the width of the working body; δ – a cross-section of the shifted $B_1B_2E_2$, shifted $A_2B'_1E_2C_2$ and dislodged $A_2C_2L_2$ soil; F_{cd} – is the force of the primary ground shift, $F_{c\delta}$ – is the force needed for displacement; G_g – gravity of the displaced soil

как активного рабочего органа на углы трения грунта о сталь, а с боков – плоскостями, являющимися продолжением боковых плоскостей активного рабочего органа;

- сдвиг грунта происходит периодически, а между сдвигами идёт накопление в грунте упругого потенциала;

- период между сдвигами равен шагу вычислений.

Площадь сдвигаемого грунта в продольном сечении заключена в пределах треугольника $B_1B_2E_2$, в общем случае фигуры $B_{i-1}B_iE_i$. Кроме этого, сдвиг происходит по нижней плоскости, проецируемой в линию B_2E_2 , в общем случае B_iE_i , поэтому

$$S_{c\delta} = 2S_{\delta} + S_H, \quad (4)$$

где S_{δ} – площадь сечения сдвигаемого грунта в продольном сечении; S_H – площадь сечения сдвигаемого грунта по нижней плоскости.

Определив в каждом положении силу сдвига, построим и аппроксимируем график зависимости $F_{c\delta} = f(\varphi)$, где φ – угол поворота ротора. Пример аппроксимации показан на рисунке 4.

Суммарная сила, необходимая для смещения грунта $F_{\Sigma CM}$, включает две составляющие: усилие на преодоление силы инерции смещаемого участка грунта и усилие на преодоление силы трения между наружными частицами смещаемого участка грунта и остальным обрабатываемым массивом

$$F_{\Sigma CM} = am_{cm} + F_{m\,cm} = am_{cm} + f_{e-e}N, \quad (5)$$

где a – ускорение смещаемого грунта; m_{cm} – масса смещаемого грунта; f_{e-e} – коэффициент трения грунта о грунт; N – нормальное усилие воздействия массива грунта на смещаемый участок грунта.

Масса смещаемого грунта изменяется по мере поворота ротора. На сечении (см. рисунок 2, б) смещаемый грунт находится в пределах участка $A_2B'_1E_2C_2$. Ширину этого участка примем равной ширине активного рабочего органа. Точку M_2 приложения силы $F_{\Sigma CM}$ и её направление определим по биссектрисе угла между A_2C_2 и B'_1E_2 .

Аналитический способ определения силы, необходимой для придания ускорения смещаемому грунту, очень сложен. Даже если

выявить направление вектора ускорения некоторой средневзвешенной частицы участка в какой-либо момент времени, то уже в следующий момент изменится как размер смещаемого участка, так и направление и величина этого вектора. Поэтому воспользуемся графо-аналитическим способом. Допустим, что при изменении положения активного рабочего органа вектор ускорения частиц участка смещаемого грунта направлен вдоль прямой $M_{i-1}M_i$ (на рисунке 2 M_1M_2). Выполнив построения и поместив данные в таблицу, можно построить зависимости ускорения смещаемого грунта и силы, необходимой для придания ускорения смещаемому грунту, от угла поворота ротора.

Смещаемый участок грунта образует грунтовой клин, внедряющийся в массив грунта. На этот клин сверху воздействует вытесняемый им грунт, отображённый на сечении (см. рисунок 2, б) в треугольнике $A_2C_2L_2$. Отрезок C_2L_2 направим из точки C_2 под углом φ_{2-2} трения грунта о грунт к горизонтали.

Объём V_6 вытесняемого грунта равен сумме объёмов грунта (см. рисунок 2, а), расположенного по ходу активного рабочего органа V_1 , находящегося справа от активного рабочего органа V_2 и слева от активного рабочего органа V_3 . Измерив площади аналогичных треугольников при различных положениях ротора, вычислим объём вытесняемого грунта, равный сумме объёма параллелепипеда и объёмов двух пирамид. Затем определим массу m_6 вытесняемого грунта над грунтовым клином в каждом положении активного рабочего органа. Занеся рассчитанные параметры в таблицу, построим зависимость массы грунта над почвенным клином от угла поворота ротора.

Силу G_6 тяжести грунта над грунтовым клином приложим в его центре масс (см. рисунок 2, б). Спроецировав силу тяжести на направление нормали к поверхности грунтового клина, получим нормальную силу $G_6 \cos \alpha$, воздействующую на поверхность грунтового клина. Если коэффициент трения грунта о грунт равен 1, то сила трения грунта о грунт по верхней части грунтового клина равна нормальной силе

$$F_{m6} = G_6 \cos \alpha, \quad (6)$$

Силу F_6 воздействия смещаемого грунта на боковую поверхность грунтового клина определим, исходя из силы G_6 тяжести грунта, воздействующего на боковую поверхность грунтового клина (рисунок 3):

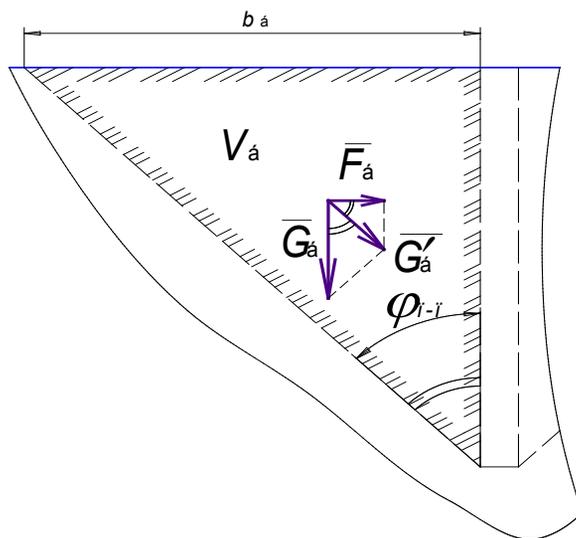


Рисунок 3 – Сила воздействия грунта на боковую поверхность смещаемого грунтового клина

Figure 3 – Strength F_6 of ground impact on the side surface of the displaced ground wedge

$$F_6 = G_6 \cos^2 \varphi_{2-2} = 0,5 G_6 = F_{m6}, \quad (7)$$

где F_{m6} – сила трения боковой поверхности грунтового клина об остальную грунт.

Объём грунта, воздействующего на грунтовой клин справа или слева от прохода активного рабочего органа, равен разности объёма пирамиды, основанием которой является фигура $A_2B'_1E_2C_2L_2$ на рисунке 2, и объёма пирамиды, с основанием $A_2C_2L_2$. Рассчитав в программе Microsoft Excel параметры на основе принятых данных, построим зависимость силы воздействия грунта на боковую поверхность грунтового клина от угла поворота ротора.

Нижняя поверхность грунтового клина воздействует на массив грунта суммарной силой $G_{\Sigma CM}$ тяжести смещаемого грунта, расположенного выше G_6 , сбоку грунтового клина G_6 и силой G_{CM} тяжести самого смещаемого грунтового клина

$$G_{\Sigma CM} = G_6 + G_6 + G_{CM}. \quad (8)$$

Пренебрегая углами наклона нижней поверхности грунтового клина, поскольку они незначительно влияют на результат, полагаем, что нормальная реакция грунта, расположенного ниже грунтового клина, равна суммарной силе тяжести смещаемого грунта во всех положениях активного рабочего органа.

Если коэффициент трения грунта о грунт равен 1, то сила $F_{тн}$, необходимая для преодоления трения грунтового клина по грунту, расположенному ниже его, равна суммарной силе тяжести смещаемого грунта. Сложив силы, необходимые для преодоления трения грунтового клина по грунту, расположенному выше $F_{тв}$, сбоку $F_{тб}$ и ниже грунтового клина $F_{тн}$, получим силу $F_{тсм}$, необходимую для преодоления трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта

$$F_{тсм} = F_{тв} + F_{тб} + F_{тн}. \quad (9)$$

Рассчитав в программе Microsoft Excel параметры на основе принятых данных, построим зависимость $F_{тсм} = f(\varphi)$. Затем вычислим суммарную силу смещения грунта активным рабочим органом при повороте ротора. Сила трения одной боковой плоскости долота о грунт $F_{тб} = f_{с-з}N_{б}$. Нормальное давление грунта на боковую плоскость активного рабочего органа

$$N_{б} = \sigma_y S_{рo}. \quad (10)$$

Из теории предельного равновесия [7]:

$$\sigma_y = \bar{q}_0 \gamma z. \quad (11)$$

Примем точку приложения нормального давления грунта на боковую плоскость активного рабочего органа на глубине $z = 2/3$ от поверхности земли и определим расстояния z и площади боковых поверхностей активного рабочего органа $S_{рo}$, погружённых в грунт, в каждом положении ротора.

Если боковые плоскости активного рабочего органа выполнены параллельными, то силу трения боковых плоскостей о грунт можно определить с помощью графических построений и по формулам 10 и 11. Если боковые плоскости активного рабочего органа выполнить сходящимися от передней поверхности к задней, при достаточной прочности активного рабочего органа, то можно уменьшить необходимый вращающий момент. Поэтому в дальнейших расчётах силу трения боковых плоскостей о грунт не учитываем.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Допустим, что один микроотрыв грунта при внедрении активного рабочего органа происходит на пути $l_0 = 18$ мм. Тогда площадь отрыва (формула 1) $S_0 = 432$ мм². Сила резания (2) $F_{сд} \approx 4$ Н. Примем шаг поворота вала ротора $11,25^\circ$. Изменяя угол поворота ротора,

из построений определяем $S_{б}$ – площадь сечения сдвигаемого грунта в продольном сечении и $S_{н}$ – по нижней плоскости; $l_{сд} = B_i E_i$ – длину сдвига (например в положении 1, $l_{сд} = B_1 E_1$). Воспользовавшись программой Microsoft Excel, по формуле 4 вычисляем площадь сдвига, по формуле 3 силу, необходимую для сдвига грунта в каждом положении рабочего органа. Результаты расчётов объёмов грунта, сдвигаемого передней поверхностью активного рабочего органа при зажатом резании, силы сдвига при прохождении активного рабочего органа в грунте помещаем в таблицу. Определив в каждом положении силу сдвига, построим на основе принятых данных и аппроксимируем график зависимости $F_{сд} = f(\varphi)$ (рисунок 4).

Из графика определим среднее значение силы и её условные значения в любой момент времени. Направление вектора и точка его приложения в каждом положении – по биссектрисе угла между $B_i E_i$ и $B_{i-1} E_{i-1}$ (см. рисунок 2, б). Условно изменение силы сдвига грунта можно аппроксимировать полилинейной зависимостью (см. рисунок 3). Среднее значение аппроксимированной силы сдвига при прохождении активного рабочего органа в грунте $F_{сд}/2 = 62,7$ Н.

Масса смещаемого грунта изменяется по мере поворота ротора. Примем шаг поворота вала ротора $11,25^\circ$ и выполним построения. Расстояние смещения грунта $s_{см} = M_i M_{i-1}$ (например в положении 1 активного рабочего органа, $s_{см} = M_1 M_0$) и площадь сечения смещаемого грунта определим измерением из построений. Объём смещаемого грунта $V_{см}$ вычислим, умножив площадь сечения смещаемого грунта $S_{см}$ на ширину b активного рабочего органа: $V_{см} = S_{см} b$. Масса смещаемого грунта $m_{см} = \rho V_{см}$. Вычисления удобно осуществлять в программе Microsoft Excel. Если воспользоваться принятыми данными [25, 26], то зависимость массы смещаемого грунта от угла поворота ротора имеет вид, показанный на рисунке 5. Здесь и далее на поле графиков показаны зависимости функций от аргументов, полученные в результате аппроксимаций, и доверительные показатели аппроксимаций.

Если техническое средство разработки грунта агрегатировать с трактором Т-150К (ХТЗ-17221), при движении трактора на первой передаче второго диапазона угловая скорость вала ротора $\omega_p = 28,4$ рад/с. Угол поворота ротора на $11,25^\circ$ соответствует $\varphi = 0,197$ рад. Время поворота ротора на этот угол $\tau_1 = \frac{\varphi}{\omega_p} = \frac{0,197}{28,4} \approx 0,007$ с.

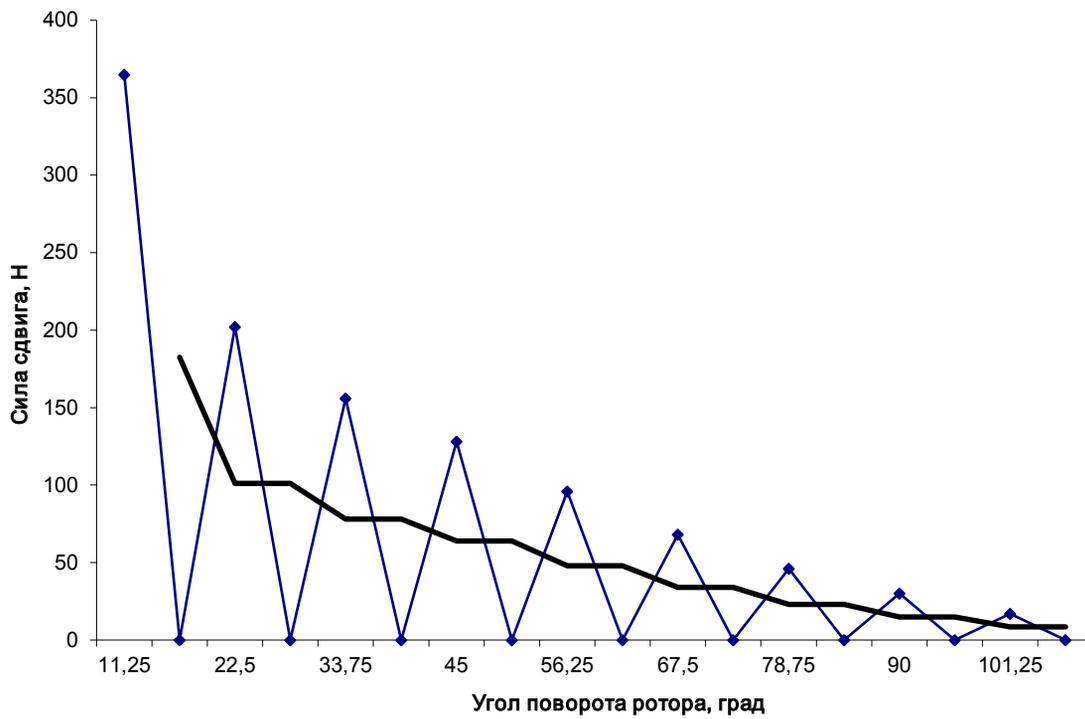


Рисунок 4 – Зависимость силы, необходимой для сдвига грунта активным рабочим органом, от угла поворота ротора

Figure 4 – Dependence of the force required to shift the ground by an active working body of the angle of the rotor turn

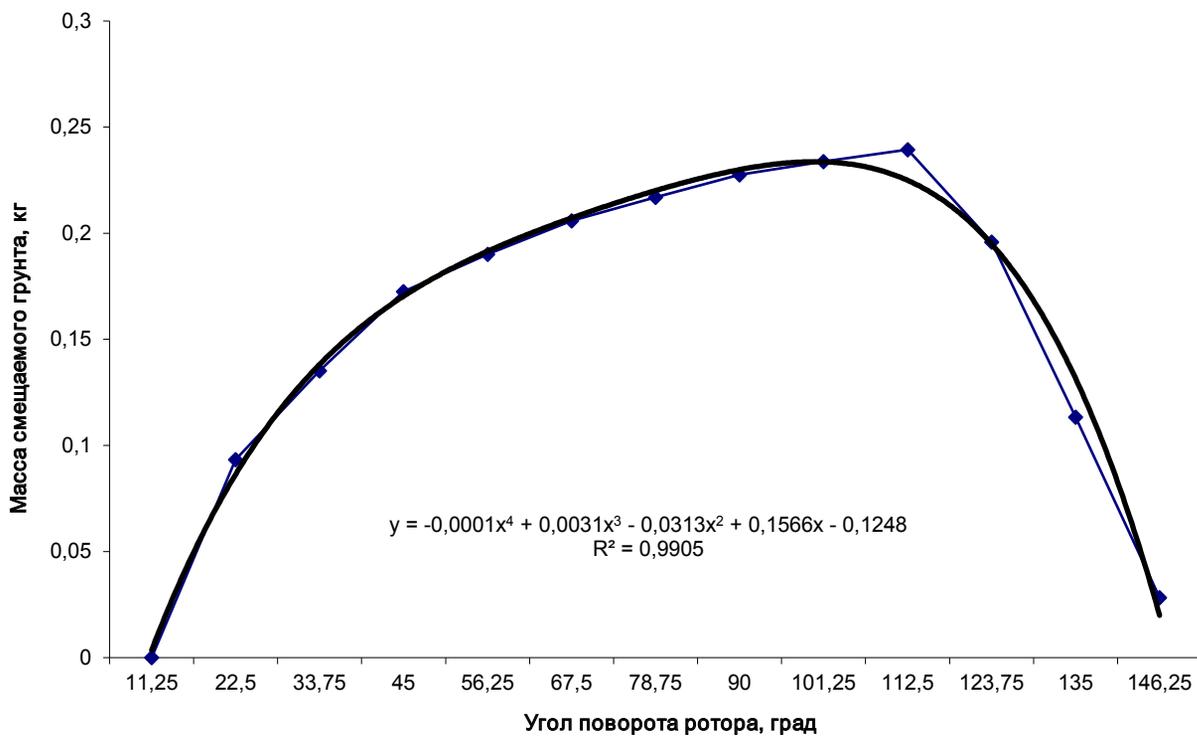


Рисунок 5 – Зависимость массы смещаемого грунта от угла поворота ротора

Figure 5 – Dependence of the mass of the displaced ground from the angle of the rotor

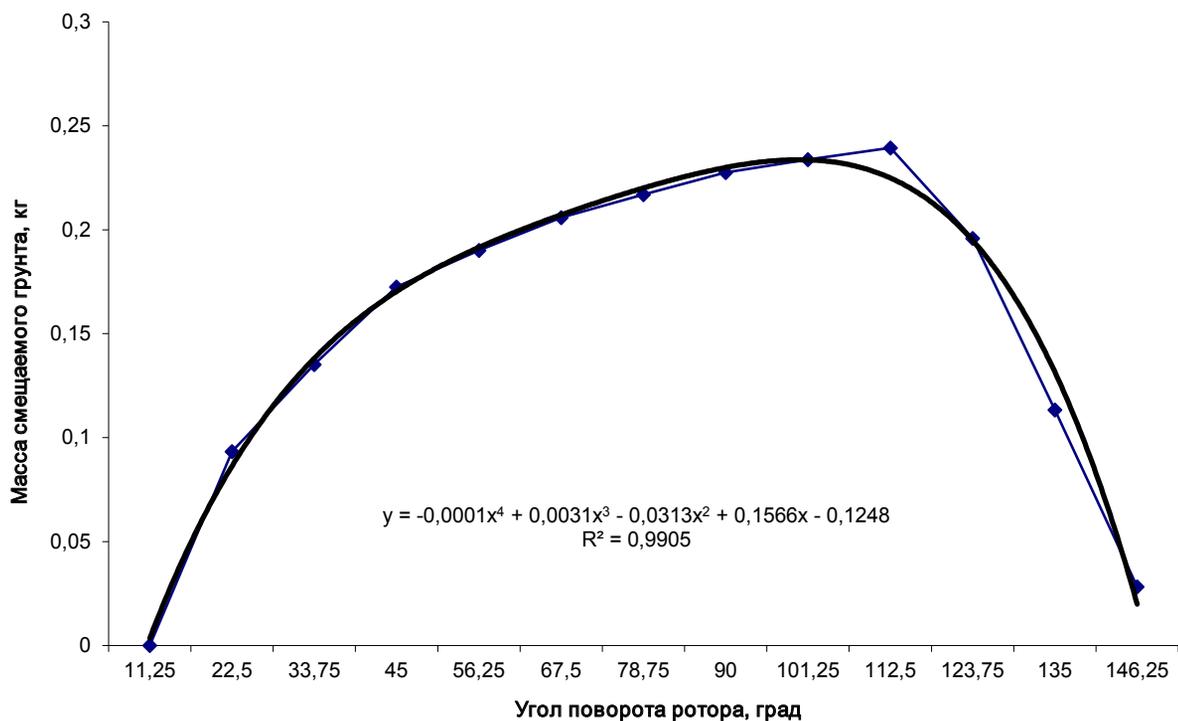


Рисунок 5 – Зависимость массы смещаемого грунта от угла поворота ротора

Figure 5 – Dependence of the mass of the displaced ground from the angle of the rotor

Время поворота ротора при движении трактора на второй, третьей и четвёртой передачах второго диапазона, соответственно, $\tau_2 \approx 0,006$ с, $\tau_3 \approx 0,005$ с, $\tau_4 \approx 0,004$ с. При расчёте остальных параметров использованы общеизвестные формулы теоретической механики. Результаты вычислений силы, необходимой для придания ускорения смещаемому грунту, при изменении угла поворота ротора и движении трактора ХТЗ-17221 на первой, второй, третьей и четвёртой передачах второго диапазона заносим в таблицу и строим соответствующие графики. Зависимость ускорения смещаемого грунта от угла поворота ротора при заданных условиях разработки грунта показана на рисунке 6, аппроксимация графика первой передачи. Зависимость силы, необходимой для придания ускорения смещаемому грунту, от угла поворота ротора представлена на рисунке 7.

Хотя масса смещаемого грунта невелика, её ускорение достигает очень больших значений. Ускорение грунта на четвёртой передаче в среднем в 3 раза больше, чем ускорение на первой передаче. Сила, необходимая для создания такого ускорения грунта при движении на четвёртой передаче, также в среднем в 3 раза больше, чем на первой передаче.

В расчёте было допущение, что при переходе активного рабочего органа из предыдущего положения в последующее положение ускоряется вся расчётная масса смещаемого грунта. Такое допущение, возможно, привело к несколько завышенным значениям силы, необходимой для создания ускорения грунта. Но определение, какая часть смещаемого грунта получила в том или ином положении первоначальное ускорение, а какая часть грунта уже ускорилась в предыдущей стадии, а в рассматриваемой стадии получает только дополнительное ускорение, является чрезвычайно сложной задачей.

При движении на первой передаче II диапазона трактора ХТЗ-17221 силы инерции смещаемого грунта меньше, чем при движении на более высоких передачах. Сила, необходимая для придания ускорения смещаемому грунту, монотонно увеличивается до того момента, когда активный рабочий орган повернётся на угол около 120° от положения, соответствующего моменту вхождения в грунт. При дальнейшем повороте активного рабочего органа сила, необходимая для придания ускорения смещаемому грунту, уменьшается.

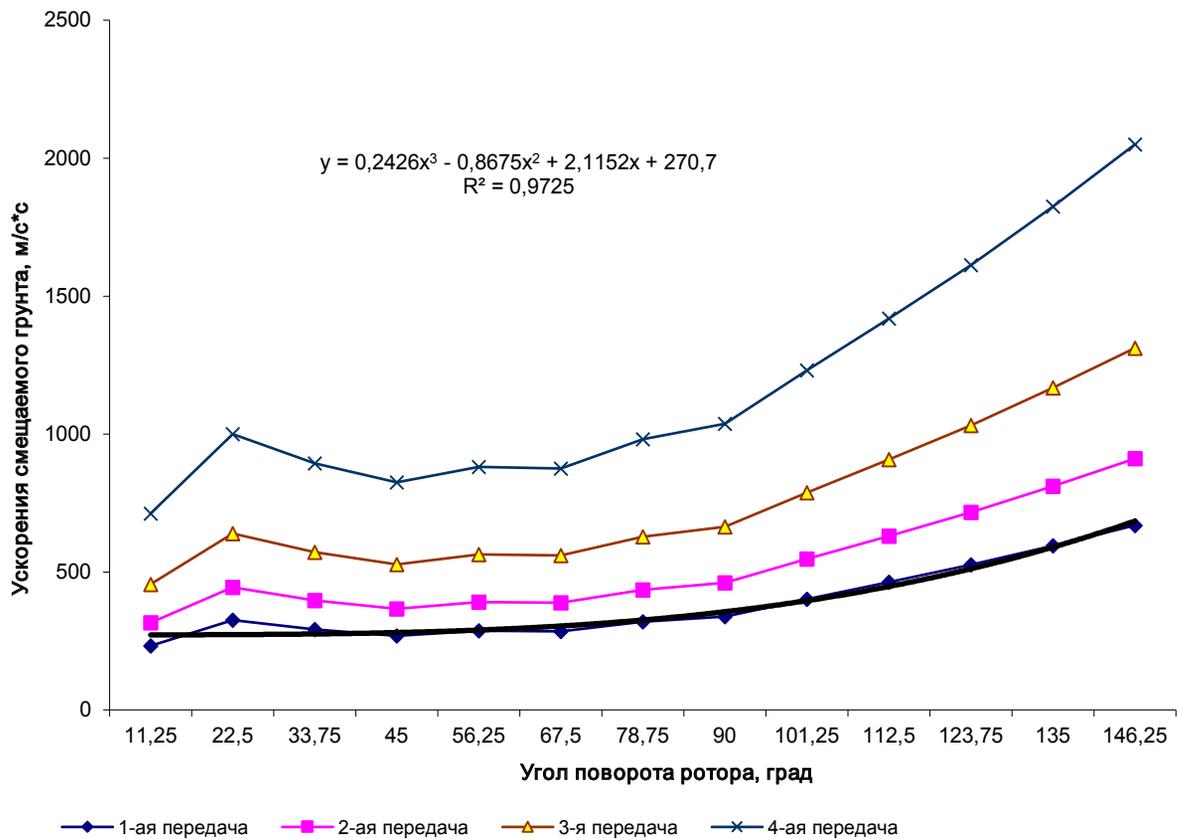


Рисунок 6 – Зависимость ускорения смещаемого грунта от угла поворота ротора

Figure 6 – Dependence of acceleration of shifted soil from the rotor angle

Объём V_g вытесняемого грунта равен сумме объёмов грунта (см. рисунок 2, а), расположенного по ходу активного рабочего органа V_1 , справа от активного рабочего органа V_2 и слева от активного рабочего органа V_3 . Измерив площади аналогичных треугольников при различных положениях ротора, вычислим объём вытесняемого грунта, равный сумме объёма параллелепипеда и объёмов двух пирамид. Затем определим массу m_g вытесняемого грунта над грунтовым клином в каждом положении активного рабочего органа и построим зависимость массы вытесняемого грунта над грунтовым клином в каждом положении активного рабочего органа от угла поворота ротора при принятых условиях разработки грунта (рисунок 8). Масса вытесняемого грунта над грунтовым клином резко увеличивается при повороте активного рабочего органа на угол до 45° , а затем плавно уменьшается.

Из чертежей определяем высоту пирамиды грунта, воздействующего на боковую поверхность смещаемого грунтового клина в каждом положении активного рабочего органа, его объём, массу и силу тяжести. Силу

воздействия окружающего грунта на боковую поверхность смещаемого грунтового клина в каждом положении активного рабочего органа определяем по формуле 7. Зависимость силы воздействия грунта на боковую поверхность смещаемого грунтового клина от угла поворота ротора на рисунке 9.

Сила воздействия грунта на боковую поверхность смещаемого грунтового клина увеличивается до того момента, когда активный рабочий орган повернётся на угол около 100° от положения, соответствующего моменту его вхождения в грунт. При дальнейшем повороте ротора сила воздействия грунта на боковую поверхность смещаемого грунтового клина уменьшается.

Исходя из массы вытесняемого грунта, определяем его силу тяжести в различных положениях ротора. Спроецировав её на направление нормали к поверхности грунтового клина, получим нормальную силу. Так как коэффициент трения грунта о грунт $\varphi_{g-g} = 1$, силу трения верхней части грунтового клина об окружающий грунт определяем по формуле 6. Силу трения боковой поверхности грунтового клина об окружающий грунт определяем по формуле 7.

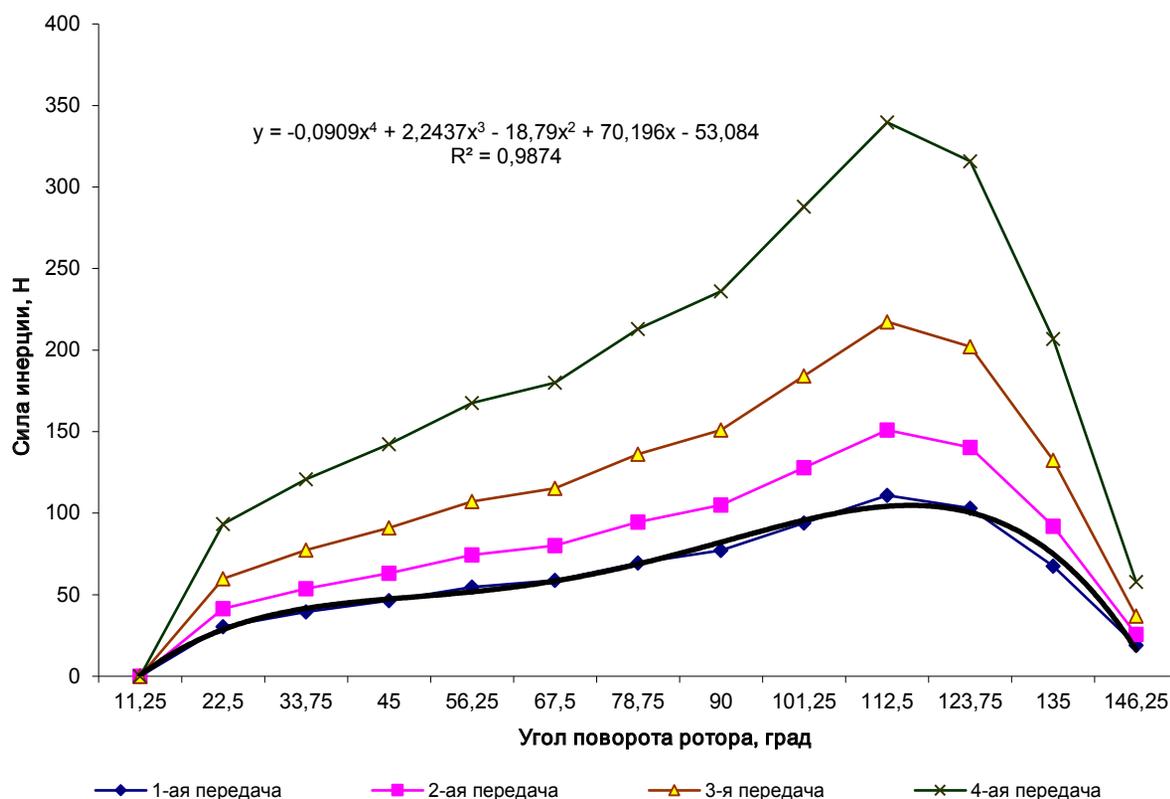


Рисунок 7 – Зависимость силы, необходимой для придания ускорения смещаемому грунту, от угла поворота ротора

Figure 7 – Dependence of force needed to accelerate the displaced ground from the rotor angle

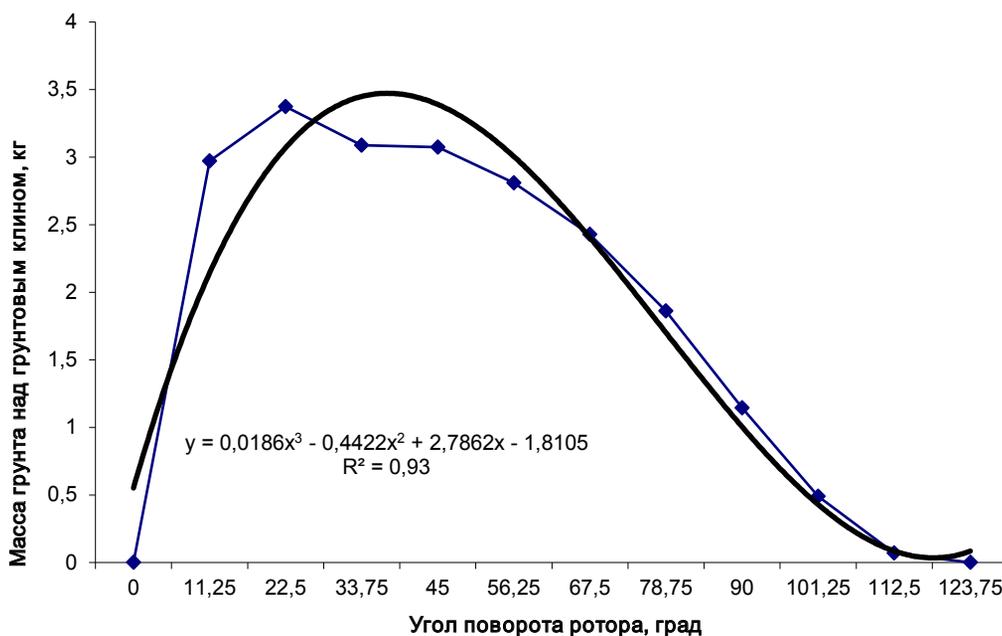


Рисунок 8 – Зависимость массы грунта над грунтовым клином от угла поворота ротора

Figure 8 – Dependence of the ground mass over the ground wedge from the rotor angle

Нижняя поверхность грунтового клина воздействует на массив грунта суммарной силой $G_{\Sigma см}$ тяжести смещаемого грунта, которую определяем по формуле 8. Если коэффициент трения грунта о грунт равен 1, то сила $F_{тн}$, необходимая для преодоления трения грунтового клина по грунту, расположенному ниже его, равна суммарной силе тяжести смещаемого грунта. Сложив силы, необходимые для преодоления трения грунтового клина по грунту, расположенному выше $F_{те}$, сбоку $F_{тб}$ и ниже грунтового клина $F_{тн}$, получим силу $F_{тсм}$, необходимую для преодоления трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта (формула 9). Результаты вычислений силы трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта при различных углах поворота ротора заносим в таблицу. Зависимость силы трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта от угла поворота ротора представлена на рисунке 10. Её можно аппроксимировать лишь полиномом четвёртого порядка.

Сила трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта при его вхождении в грунт резко увеличивается до того момента, когда активный рабочий орган повер-

нётся на угол около 35° от положения, соответствующего моменту его вхождения в грунт. При дальнейшем повороте ротора от 35° до 80° сила трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта изменяется незначительно. При дальнейшем повороте ротора она уменьшается.

Сложив силы, необходимые для придания ускорения смещаемому грунту, силы трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта при различных углах поворота ротора, вычислим суммарные силы смещения грунта активным рабочим органом при различных углах поворота ротора. Зависимость суммарной силы смещения грунта активным рабочим органом от угла поворота ротора при движении агрегата на различных передачах II диапазона трактора ХТЗ-17221 показана на рисунке 11.

Суммарная сила смещения грунта активным рабочим органом резко увеличивается от момента вхождения активного рабочего органа в грунт до его поворота на угол около 35° . При дальнейшем повороте ротора от 35° до 110° суммарная сила смещения грунта активным рабочим органом увеличивается незначительно. При дальнейшем повороте ротора она уменьшается.

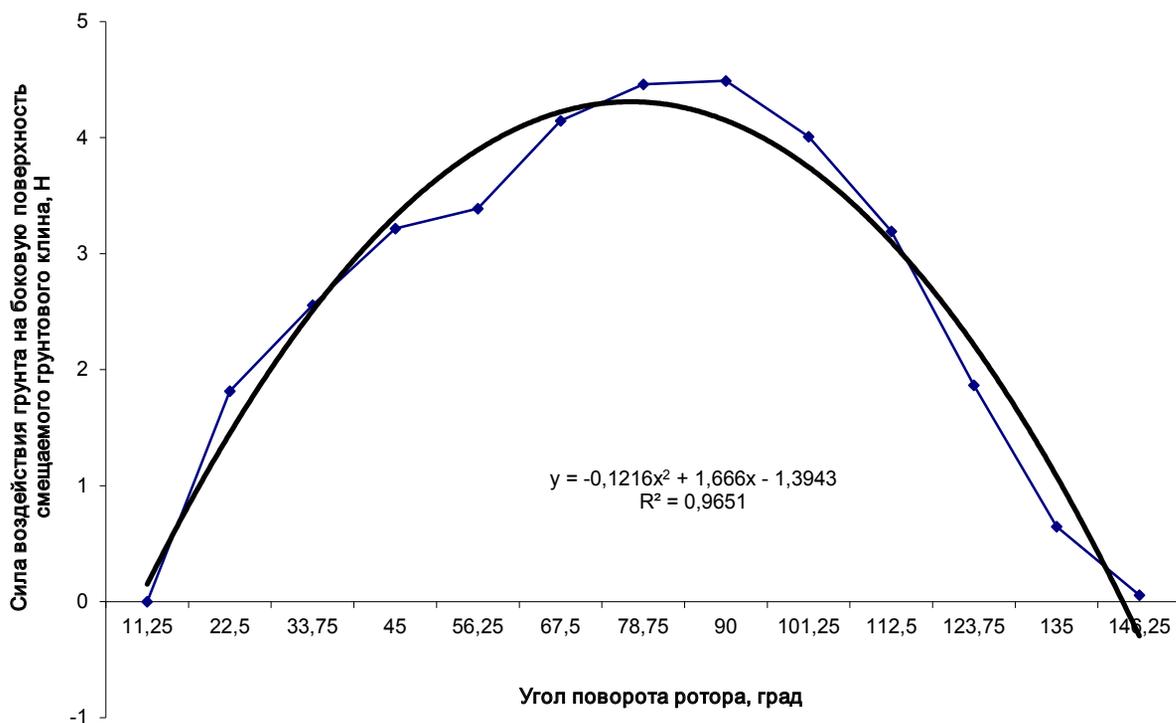


Рисунок 9 – Зависимость силы воздействия грунта на боковую поверхность смещаемого грунтового клина от угла поворота ротора

Figure 9 – Dependence of ground force on the side surface of the displaced ground wedge from the rotor angle

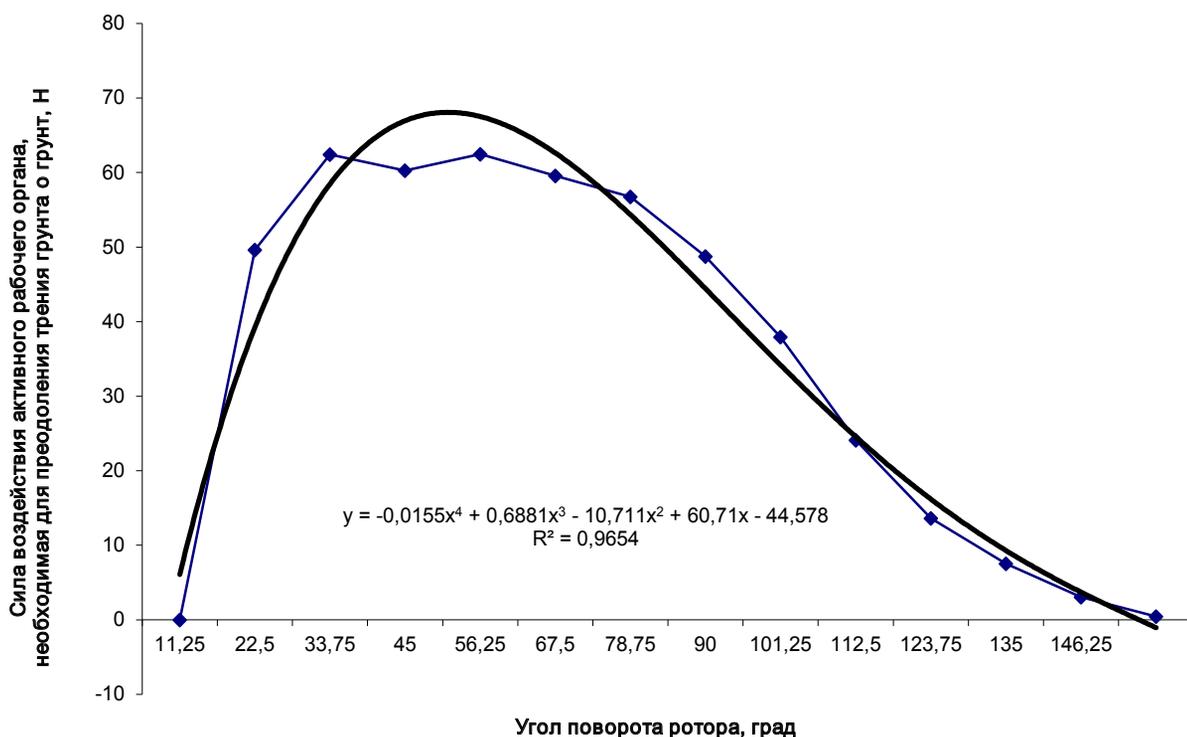


Рисунок 10 – Зависимость силы трения смещаемого активным рабочим органом грунтового клина о массив грунта от угла поворота ротора

Figure 10 – Dependence of friction force displaced by the active working body of the ground wedge on the array of soil from the rotor angle

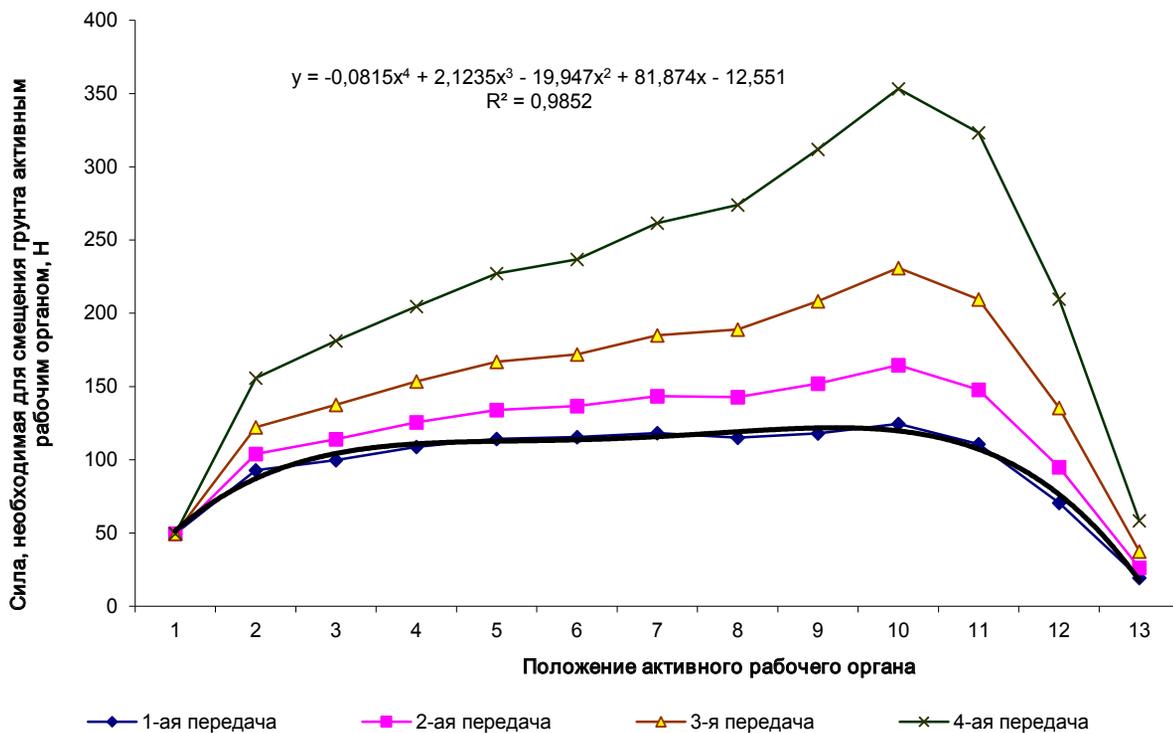


Рисунок 11 – Зависимость суммарной силы смещения грунта активным рабочим органом от угла поворота ротора при движении агрегата на различных передачах II диапазона трактора ХТЗ-17221

Figure 11 – Dependence of the total force of ground displacement by an active working body from the rotor angle when moving the unit on various transmissions of the II range HTP-17221 tractor

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа взаимодействия активного рабочего органа с грунтом при зажатом резании выявлена сила резания грунта носком рабочего органа и зависимости от угла поворота ротора: силы, необходимой для первичного сдвига грунта передней поверхностью рабочего органа; суммарной силы смещения грунта активным рабочим органом. Зная эти силы и точки их приложений, несложно определить необходимый вращающий момент и мощность привода ротора, если все рабочие органы осуществляют зажатое резание, когда лезвие зажато грунтом с обеих сторон [25]. Для реализации цели исследования необходимо также произвести анализ взаимодействия активных рабочих органов с грунтом при полужахом резании, то есть резании, когда к лезвию прижат грунт лишь с одной стороны, в том числе, когда силой воздействия грунта на лезвие с другой стороны можно пренебречь.

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. Попов Г.Ф. Рабочие органы фрез // Материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. ОНТИ ВИСХОМ, М.: 1970. С. 490–497.
3. Карасёв Г.Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. №4. С. 36–42.
4. Карнаухова 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.
5. Кравец И.М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // Строительные и дорожные машины. 2010. №5. С. 47–49.
6. 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.
7. Берестов Е.И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // Строительные и дорожные машины. 2010. №11. С. 34–38.
8. 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.
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. Sun X. ACT-timely experimental study on mesoscopic 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. 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.

17. Нилов В.А., Фёдоров Е.В. Разработка грунта скрепером в условиях свободного резания // Строительные и дорожные машины. 2016. №2. С. 7–10.

18. Чмиль В.П. Насосно-аккумулятивный привод рыхлителя с автоматическим выбором угла резания // Строительные и дорожные машины. 2016. №11. С. 18–20.

19. 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.

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

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

22. 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.

23. 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.

24. 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.

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

26. Николаев В.А. Ориентировочный расчёт мощности циклического резания грунта // Вестник СибАДИ, 2019. №3. С. 228–240.

REFERENCES

1. Zhuk A.F. Teoreticheskoe obosnovanie racional'noj tehnologicheskoy shemy i parametrov rotacionnogo pluga [Theoretical substantiation of rational technological scheme and parameters of rotary plow]. *Sbornik nauchnyh trudov «Teorija i raschjot pochvoobrabatyva-*

- jushhih mashin*. Т 120. Moscow, Mashinostroenie, 1989. P 145–153 (in Russian).
2. Popov G.F. Rabochie organy frez [Working bodies of the cutters]. Moscow, *Materialy NTS VISHOM*. 27. ONTI VISHOM, 1970. P. 490–497 (in Russian).
3. 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).
4. Karnaukhov A.I. Orlovskiy S.N. Opredelenie zatrat udel'noj jenergii na process rezaniya 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 Russian).
5. Kravets I.M. Determinirovannaja matematicheskaja model' vremennogo raspredelenija t'jagovogo usilija dlja mnogorezcovyh rabochih organov zemlerojnyh mashin [Determine critical cutting depth while soils' combined cutting]. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezaniya pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofreznoj. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 5: 47–49 (in Russian).
6. Kirillov F.F. [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).
7. Berestov E.I. Vlijanie trenija grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniyu [Influence of friction of soil on the surface of the knife cutting resistance]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 34–38 (in Russian).
8. Vershinin A.V., Subov V.S., Tyulnev A.M. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny [Improving the efficiency of the working mechanisms for the development of frozen soil]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2012; 8: 42–44 (in Russian).
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 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. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.YU. Issledovanie upravlyaemyh nozhevnyh sistem zemlerojno-transportnyh mashin [Study of guided knife systems of ground-moving vehicles]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2017; 2: 12–15 (in Russian).
17. Nilov V.A., Fyodorov 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 Russian)
18. CHmil' V.P. Nasosno-akkumulyativnyj privod ryhlitelja s avtomaticheskim vyborom ugla rezaniya [Pump-accumulating ripper drive with automatic cutting angle selection]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 11: 18–20 (in Russian).
19. Kabashev R.A., Turgumbaev S.D. Eksperimental'nye issledovaniya processa kopaniya gruntov rotor-no-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 Russian).
20. Syomkin D.S. O vlijanii skorosti rabocheho organa na silu soprotivleniya rezaniyu 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 Russian).
21. Konstantinov YU.V. Metodika raschyota soprotivleniya i momenta soprotivleniya rezaniyu pochvy pryamym 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 Russian).
22. Syromyatnikov YU.N., Hramov I.S., Vojnash S.A. Gibkij element v sostave rabochih organov rotornoj pochvoobrabatyvayushchej ryhlitel'no-separiruyushchej 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 Russian).
23. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoj analiz mekhanizmov peremeshcheniya rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih 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 Russian).
24. Dranyaev S.B., CHatkin M.N., Koryavin S.M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvayushchej frezy [Simulation of the work of a screw G-shaped knife soil cutter]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017; 7: 13–19 (in Russian).
25. Nikolaev V.A. Mashiny dlya obrabotki pochvy. Teoriya i raschyot [Soil processing machines. Theory and calculation]. Yaroslavl': Izd-vo FGBOU VPO YAGSKHA, 2014: 358 (in Russian).
26. Nikolaev V.A. Orientirovochnyj raschyot moshchnosti ciklicheskogo rezaniya grunta [Estimated calculation of the power of cyclical cutting of the ground]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019; 3: 228–240 (in Russian).

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 – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Construction and Road Machines' Department, Yaroslavl Technical University (Yaroslavl, 88, Moskovsky Ave., e-mail: Nikolaev53@inbox.ru).