УДК 625.08
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-238-250

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕГО ПРИВОДА АГРЕГАТА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕГО СЛОЯ АВТОДОРОГИ

В.А. Николаев
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
г. Ярославль, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *Россия имеет большую пространственную разобщённость населённых пунктов и других объектов, поэтому использовать в строительстве автомобильных дорог малопроизводительные технические средства циклического действия нерационально. Для повышения темпа строительства дорог, улучшения качества, уменьшения затрат энергии на строительство дорог, там, где позволяет рельеф, экономически целесообразно применять комплекс агрегатов непрерывного действия. Агрегаты непрерывного действия, перемещаясь друг за другом, будут последовательно выполнять комплекс работ, осуществляя полностью строительство автодороги поточным методом. В составе комплекса должен быть агрегат непрерывного действия для формирования подстилающего слоя. Для создания сложных агрегатов необходимо их теоретическое обоснование. С целью определения геометрических и динамических параметров загружающей части агрегата для формирования подстилающего слоя рассмотрен процесс перемещения ковша, заполненного грунтом, до его выгрузки.*
Методика исследования. *На основе конструктивной компоновки загрузочной части агрегата процесс перемещения ковша, заполненного грунтом, до его выгрузки разделён на этапы: вертикального подъёма, перемещения в направлении ведущей звёздочки верхнего привода, две фазы поворота ковша на ведущих звёздочках верхнего привода, перемещения от момента окончания поворота на ведущей звёздочке верхнего привода до момента начала поворота на нижнем поворотном ролике. При перемещении ковша вертикально вверх высыпание грунта исключено. Графическим путём подобран такой угол наклона ковша при его перемещении в направлении ведущей звёздочки верхнего привода, при котором грунт не будет высыпаться из ковша. Рассмотрены две фазы поворота ковша на ведущих звёздочках верхнего привода и перемещение ковша от момента окончания поворота на ведущей звёздочке верхнего привода до момента начала поворота на нижнем поворотном ролике. Выведены необходимые зависимости параметров.*
Результаты. *На основе разработанной методики определены геометрические и динамические параметры загружающей части агрегата. В частности рассчитаны: вращающий момент верхнего привода, угловая скорость приводных звёздочек, мощность, необходимая для верхнего привода, передаточное отношение от гидромотора к звёздочкам. Исходя из передаваемой мощности, выбран гидромотор для верхнего привода агрегата.*
Заключение. *В результате проведённых расчётов выявлены: максимальное тяговое усилие перемещения всех ковшей в период их перемещения для выгрузки грунта, вращающий момент верхнего привода, угловая скорость приводных звёздочек верхнего привода, мощность, необходимая для верхнего привода. Целесообразно использовать для верхнего привода агрегата героторный гидромотор МТ-160 и двухступенчатый планетарный редуктор. Проведённые расчёты позволили разработать конструкцию элементов загружающей части агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *агрегат непрерывного действия, грунт, верхний привод, геометрические параметры, тяговое усилие, вращающий момент, мощность, передаточное отношение.*

Поступила 30.04.21, принята к публикации 30.06.21.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Николаев, В.А. Обоснование параметров верхнего привода агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги / В.А. Николаев. – DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2021-18-3-238-250 // *Вестник СибАДИ.* – 2021. – Т. 18, № 3(79). − С. 238-250.

© Николаев В.А., 2021

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-238-250

FEASIBILITY OF CONTINUOUS ACTION UNIT PARAMETERS FOR ROAD UNDERLAY FORMATION

Vladimir A. Nikolayev
Yaroslavl Technical University,
Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

Introduction. *Russia has a large spatial disunity of settlements and other objects. Therefore, it is irrational to use low-productivity technical means of cyclical action in the construction of roads. To increase the pace of road construction, improve quality, reduce energy costs for road construction, where relief allows, it is economically feasible to use a set of units of continuous action. Continuous action units, moving one after another, will consistently perform a set of works, carrying out the full construction of the road by flow method. The complex should have a continuous action unit to form a underlying layer. To create complex units, their theoretical justification is necessary. In order to determine the geometric and dynamic parameters of the loading part of the unit to form the underlying layer, the process of moving the bucket filled with soil before it is unloaded is considered.*
The method of research. *Based on the constructive layout of the loading part of the unit, the process of moving the bucket filled with soil before it is unloaded is divided into the stages: vertical ascent, moving in the direction of the leading star of the upper drive, two phases of the bucket rotation on the leading stars of the upper drive, moving from the moment of the end of the turn on the leading star of the upper drive to the start of the turn on the lower turn. When the bucket moves vertically up, the ground is no for dumped. Graphically, this angle of the bucket is chosen when it moves in the direction of the leading star of the upper drive, at which the ground will not fall out of the bucket. Two phases of the bucket rotation on the leading stars of the upper drive and moving the bucket from the moment of the end of the turn on the leading star of the upper drive to the moment of the turn on the lower turning roller are considered. The necessary parameters dependencies have been deduced.*
Results. *Based on the developed methodology, the geometric and dynamic parameters of the loading part of the unit are defined. In particular, the torque of the top drive, the angular velocity of the drive sprockets, the power required for the top drive, the transmission ratio from the hydraulic motor to the sprockets are calculated. Based on the power transferred, a hydromotor was selected for the upper drive of the unit.*
Conclusion. *The calculations reveal the maximum traction force of all buckets during their travel to discharge the soil, the torque of the top drive, the angular velocity of the top drive sprockets and the power required for the top drive. It is advisable to use for the upper drive of the unit gerotor hydromotor MT-160 and two-stage planetary gearbox. The calculations made it possible to develop the design of the elements of the loading part of the continuous action unit to form the underlying layer of roads.*

KEYWORDS. *Continuous action unit, soil, top drive, geometric parameters, traction force, torque, power, transmission ratio.*

Submitted 30.04.21, revised 30.06.21.
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. Feasibility of continuous action unit parameters for road underlay formation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (3): 238-250. DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-238-250

© Nikolayev V.A., 2021

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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1) разработана конструктивная компоновка загрузочной части агрегата; процесс перемещения ковша, заполненного грунтом, до его выгрузки разделён на этапы;

2) графическим путём подобран угол наклона ковша при его перемещении в направлении ведущей звёздочки верхнего привода;

3) рассмотрены две фазы поворота ковша на ведущих звёздочках верхнего привода и перемещение ковша от момента окончания поворота на ведущей звёздочке верхнего привода до момента начала поворота на нижнем поворотном ролике; выведены необходимые зависимости параметров;

4) определены: вращающий момент, мощность, необходимая для верхнего привода, передаточное отношение от гидромотора к верхнему приводу.

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от многих других стран мира Россия имеет большую пространственную разобщённость населённых пунктов и других объектов, поэтому использовать в строительстве автомобильных дорог малопроизводительные технические средства циклического действия нерационально. Для повышения темпа строительства дорог, улучшения качества, уменьшения затрат энергии на строительство дорог, там, где позволяет рельеф, экономически целесообразно применять комплекс агрегатов непрерывного действия. Агрегаты непрерывного действия, перемещаясь друг за другом, будут последовательно выполнять комплекс работ, осуществляя полностью строительство автодороги поточным методом. Такой комплекс агрегатов целесообразно использовать для строительства дорог не только в России, но и в других странах, например в Казахстане, Бразилии и т. д. В настоящее время конструкции некоторых агрегатов запатентованы, другие находятся в стадии разработки. В частности, в составе комплекса должен быть агрегат непрерывного действия для формирования подстилающего слоя (патент РФ №2689007). Он предназначен для увеличения производительности труда при строительстве автомобильных дорог и других объектов, для строительства которых необходимо снятие верхнего слоя грунта.

Для создания сложных агрегатов необходимо их теоретическое обоснование. Так, в общем объёме затрат энергии на строительство дорог существенную долю занимают работы, направленные на резание и транспортирование грунта. Теоретические основы такого резания грунта весьма подробно рассмотрены в работах[1,2] [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. К сожалению, авторы теоретических исследований используют преимущественно синтезный метод, оценивая затраты энергии на резание грунта рабочим органом в целом. Такой подход правомерен, но затрудняет целенаправленное совершенствование элементов рабочих органов. Поэтому в ходе теоретического обоснования с целью конструктивной компоновки агрегатов непрерывного действия применён анализный метод [25, 26, 27]. Так, теоретически обоснованные общие затраты энергии на резание грунта объёмом один кубический метр ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог $u_{к-гр} \approx 109\,кДж/м^3$. На основании проведённых расчётов определён вращающий момент, мощность, необходимая для нижнего привода, разработана конструкция многих элементов режущей части агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог. Для определения геометрических и динамических параметров загружающей части агрегата рассмотрим процесс перемещения ковша, заполненного грунтом, до его выгрузки.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Наполненный грунтом ковш цепи перемещают вверх и в сторону для загрузки грунта в транспортное средство. Для перемещения ковшей с грунтом целесообразно применить отдельный верхний привод. Конструктивная компоновка загрузочной части агрегата показана на рисунке 1. Цепи с ковшами, заполненными грунтом, после схода со звездочки нижнего привода, перемещаются вертикально до поворота на поворотном ролике *2*. После этого ковш, совершив поворот на поворотном ролике, движется под некоторым углом γ к горизонтали в направлении ведущей звёздочки верхнего привода *3*. Там цепи с ковшами

[1] Жук А.Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ротационного плуга. Сборник научных трудов «Теория и расчёт почвообрабатывающих машин». Т 120. Москва: Машиностроение, 1989. С. 145–153.

[2] Попов Г.Ф. Рабочие органы фрез. Москва: Материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. ОНТИ ВИСХОМ, 1970. С. 490– 497.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

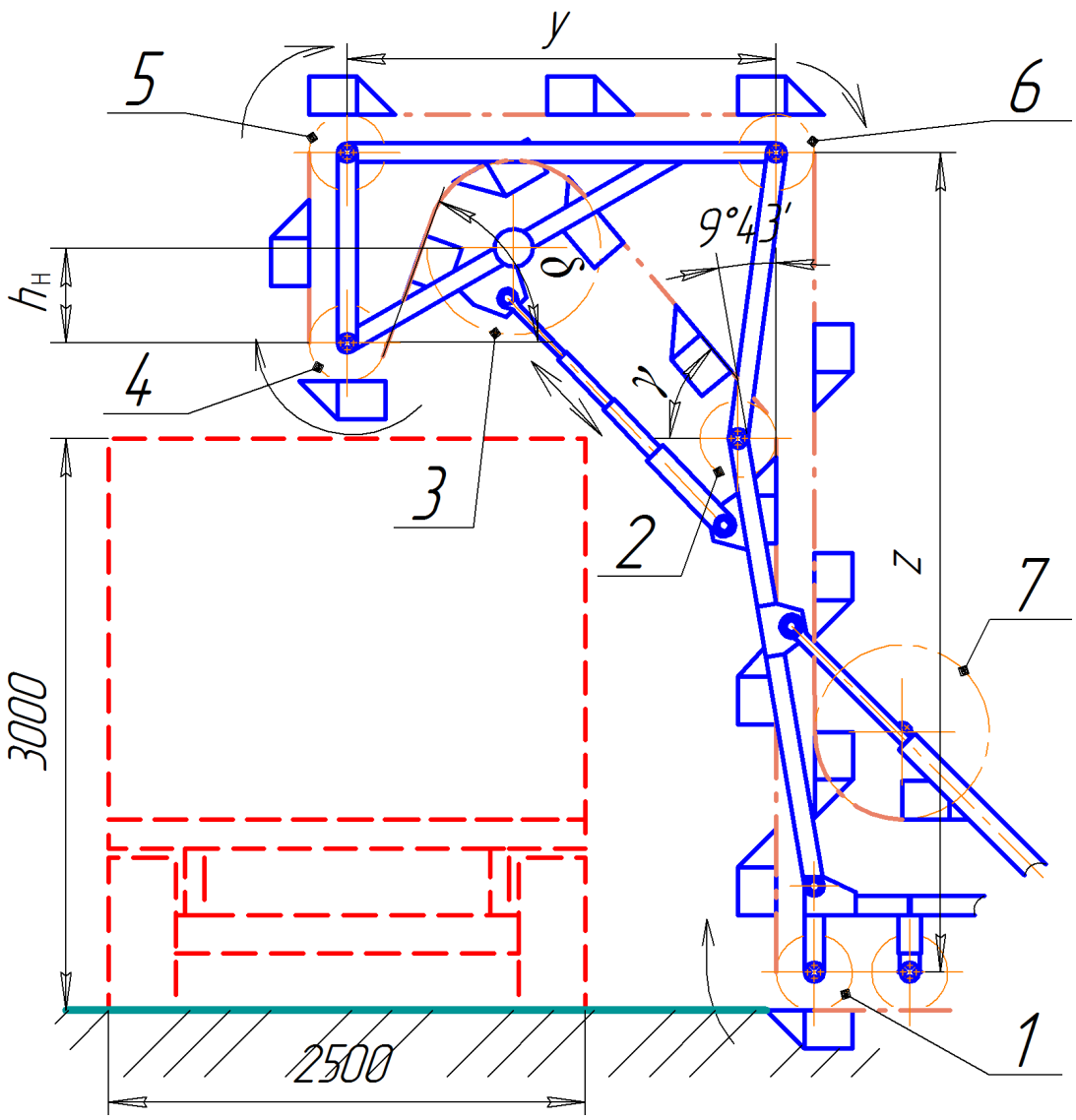

Рисунок 1 – Конструктивная компоновка загрузочной части агрегата: 1 – звёздочка нижнего привода; 2, 4, 5, 6 – поворотный ролик; 3 – звёздочка верхнего привода; 7 – большой поворотный ролик

Figure 1 – Constructive layout of the loading part of the unit: 1 – a star of the lower drive; 2, 4, 5, 6 – a turning roller; 3 – an upper-drive asterisk; 7 – a large turning roller

совершают поворот на ведущих звёздочках верхнего привода на угол δ и движутся влево-вниз (по ходу агрегата). При этом грунт должен выпасть в кузов транспортного средства. Затем цепи с опорожненными ковшами опоясывают поворотные ролики *4*, *5*, *6* и большой поворотный ролик *7*.

На основе конструктивной компоновки загрузочной части агрегата процесс перемещения ковша, заполненного грунтом, до его выгрузки следует разделить на этапы:

- вертикального подъёма, перемещения в направлении ведущей звёздочки верхнего привода;
- две фазы поворота ковша на ведущих звёздочках верхнего привода;
- перемещения от момента окончания поворота на ведущей звёздочке верхнего привода до момента начала поворота на нижнем поворотном ролике *4*;
- поворот на нижнем поворотном ролике.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

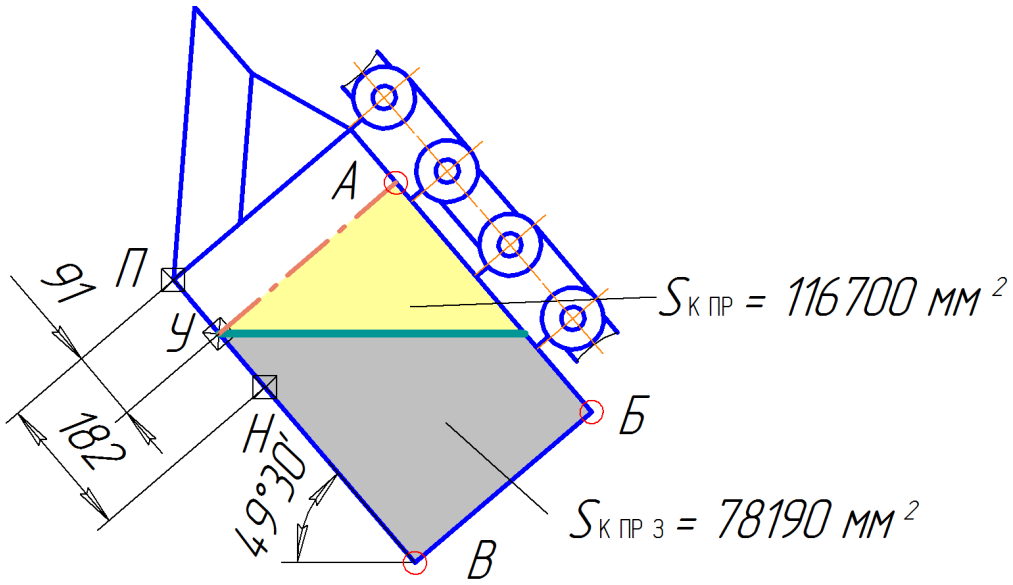

Рисунок 2 – К определению предельного угла наклона ковша при его перемещении в направлении ведущей звёздочки верхнего привода

Figure 2 - To determine the extreme angle of the bucket as it moves in the direction of the leading star of the upper drive

Коэффициент, учитывающий заполнение ковша, предварительно был принят $k_з = 0{,}8$ [27]. В ходе расчётов объём ковша $V_к$ изменился. Поэтому коэффициент, учитывающий заполнение ковша, следует скорректировать

$$k_з = \frac{k_p B h_{сл} l_{мк} v_a}{V_к v_ц}, \qquad (1)$$

где B – ширина захвата агрегата для удаления грунта с подстилающего слоя автодороги; $h_{сл}$ – толщина срезаемого слоя грунта; $l_{мк}$ – расстояние между ковшами; v_a – скорость агрегата; $v_ц$ – скорость цепей, к которым присоединены ковши.

При перемещении ковша вертикально вверх высыпание грунта исключено. Графически определим предельный угол наклона ковша γ при его перемещении в направлении ведущей звёздочки верхнего привода (см. рисунок 1). Подберём такой угол наклона ковша при его перемещении в направлении ведущей звёздочки верхнего привода, при котором грунт не будет высыпаться из ковша (рисунок 2).

Рассмотрим поворот ковша на ведущих звёздочках верхнего привода (рисунок 3).

Для последующего высыпания грунта из ковша угол его наклона к горизонтали, после поворота на ведущих звёздочках верхнего привода, должен быть не менее угла естественного откоса грунта. Примем угол наклона ковша к горизонтали, после поворота на ведущей звёздочке верхнего привода, $\delta = 70°$ (см. рисунок 1). Тогда угол поворота ковша на ведущих звёздочках верхнего привода будет 120°. Положение ковша после поворота показано штрих-пунктиром.

Определим силы, действующие на грунт при повороте ковша на ведущих звёздочках верхнего привода. В момент начала поворота ковша на ведущих звёздочках верхнего привода на грунт, расположенный в ковше, действует сила $G_{гр}$ тяжести, центробежная сила инерции $F_{цб}$ и сила инерции F_j, вызванная торможением грунта в начале поворота. Масса грунта в ковше $m_к$. Сила тяжести грунта $G_{гр}$.

Радиус начальной окружности ведущей звёздочки верхнего привода должен быть таким, чтобы ковш при повороте обходил ведущий вал, а соседние ковши не касались друг друга. Отсюда радиус начальной окружности ведущей звёздочки верхнего привода должен быть не менее 450 мм.

Уточним радиус начальной окружности ведущей звёздочки верхнего привода. Шаг цепи $t = 125мм$ [27]. Если ведущая звёздочка верхнего привода будет иметь 23 зуба, радиус начальной окружности ведущей звёздочки верхнего привода $r_{звп} = 458мм$.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

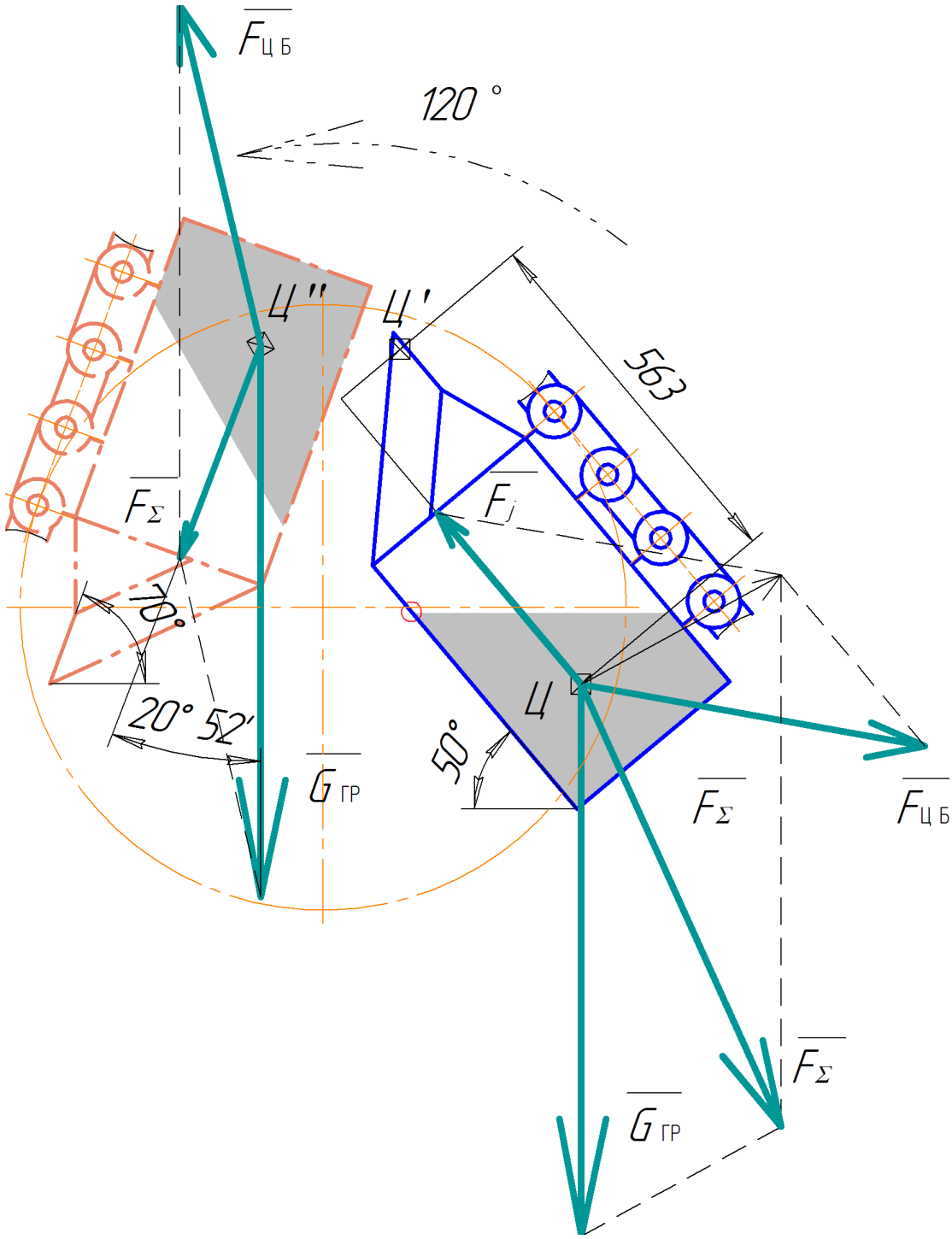

Рисунок 3 – Поворот ковша на ведущих звёздочках верхнего привода

Figure 3 – The bucket turn on the leading stars of the upper drive

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Скорость ковша $v_к$. Отсюда угловая скорость вала верхнего привода

$$\omega_{вп} = \frac{v_к}{r_{звп}}. \quad (2)$$

Центробежная сила инерции

$$F_{цб} = m_к \omega_{вп}^2 r_{звп}. \quad (3)$$

Разделим поворот на две фазы. В начале поворота грунт обладает скоростью $v_к$. При повороте ковша на 90°, в течение первой фазы, эта линейная скорость уменьшается до нуля. Допустим, центр масс грунта при повороте на этот угол не сместится. Повернём центр масс грунта *Ц* на 90° в положение *Ц'* (см. рисунок 3). Из рисунка выявим расстояние, на которое переместится центр масс грунта по направлению вектора начальной скорости $v_к$ $l_{грвп} = 563мм$. Время поворота центра масс грунта на угол $\varphi_{гр} = 90°$

$$\tau_{гр} = \frac{\varphi_{гр}}{\omega_{вп}}. \quad (4)$$

Ускорение грунта

$$a_{гр} = \frac{0 - v_к}{\tau_{гр}}. \quad (5)$$

Сила инерции

$$F_j = a_{гр} m_к. \quad (6)$$

Приложим силы к центру масс грунта *Ц* в начале поворота ковша и, сложив их, определим равнодействующую F_Σ (см. рисунок 3).

Рассмотрим схему сил, приложенных к грунту в течение второй фазы, в момент окончания поворота на ведущей звёздочке верхнего привода. В этот момент на грунт, расположенный в ковше, действует сила $G_{гр}$ его тяжести и центробежная сила инерции $F_{цб}$. Приложим силы к центру масс грунта *Ц"*, сложим их и определим равнодействующую F_Σ (см. рисунок 3).

Рассмотрим перемещение ковша от момента окончания поворота на ведущей звёздочке верхнего привода до момента начала его поворота на нижнем поворотном ролике *4* (см. рисунок 1). В следующий момент после поворота на ведущей звёздочке верхнего привода будет действовать на грунт только сила его тяжести. Если исключить трение грунта о стенки корпуса ковша и липкость грунта, то грунт с этого момента начинает свободное падение. Длина нисходящего участка цепей должна быть такой, чтобы грунт успел покинуть корпус ковша до его поворота на нижнем поворотном ролике. Длина нисходящего участка цепей зависит от расстояния по вертикали $h_н$ (рисунок 4) между осью вращения ведущих звёздочек верхнего привода *3* и осью вращения нижнего поворотного ролика.

Допустим, порция грунта, выпадая из ковша, сохраняет свою форму. Из геометрического соотношения на рисунке 4

$$h_н = H + 124 - 396 = H - 272мм. \quad (7)$$

Разность высот нисходящего участка цепей H ковш преодолеет за период времени

$$\tau_н = \frac{H}{v_к cos20°}.$$

За этот период времени грунт должен выпасть из ковша

$$h = \frac{g\tau_н^2}{2} \rightarrow \tau_н = \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

Приравняв эти два уравнения, получим

$$\frac{H}{v_к cos20°} = \sqrt{\frac{2h}{g}} \rightarrow H = \sqrt{\frac{2h(v_к cos20°)^2}{g}}. \quad (8)$$

Определив минимальное расстояние H, вычисляем разность высот между осью ведущей звёздочки верхнего привода и осью нижнего поворотного ролика $h_н$.

В начале поворота ковша на нижнем поворотном ролике от совместного действия силы $G_{гр}$ тяжести грунта и силы F_j инерции грунта, вызванной его торможением в начале поворота, ковш покинет налипший на него грунт.

Из рисунка 1 определяем максимальное количество ковшей на участке подъёма грунта $n_{кпг}$. Расчётная масса грунта в одном ковше $m_к$. Масса поднимаемого грунта на участке подъёма

$$m_{пг} = m_к n_{кпг}. \quad (9)$$

Сила его тяжести

$$G_{пг} = g m_{пг}. \quad (10)$$

Так как сила тяжести ковша $G_к$, сила тяжести ковшей совместно с участками цепей, осуществляющих подъём грунта,

$$G_{к+ц} = n_{кпг}(G_к + G_ц). \quad (11)$$

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

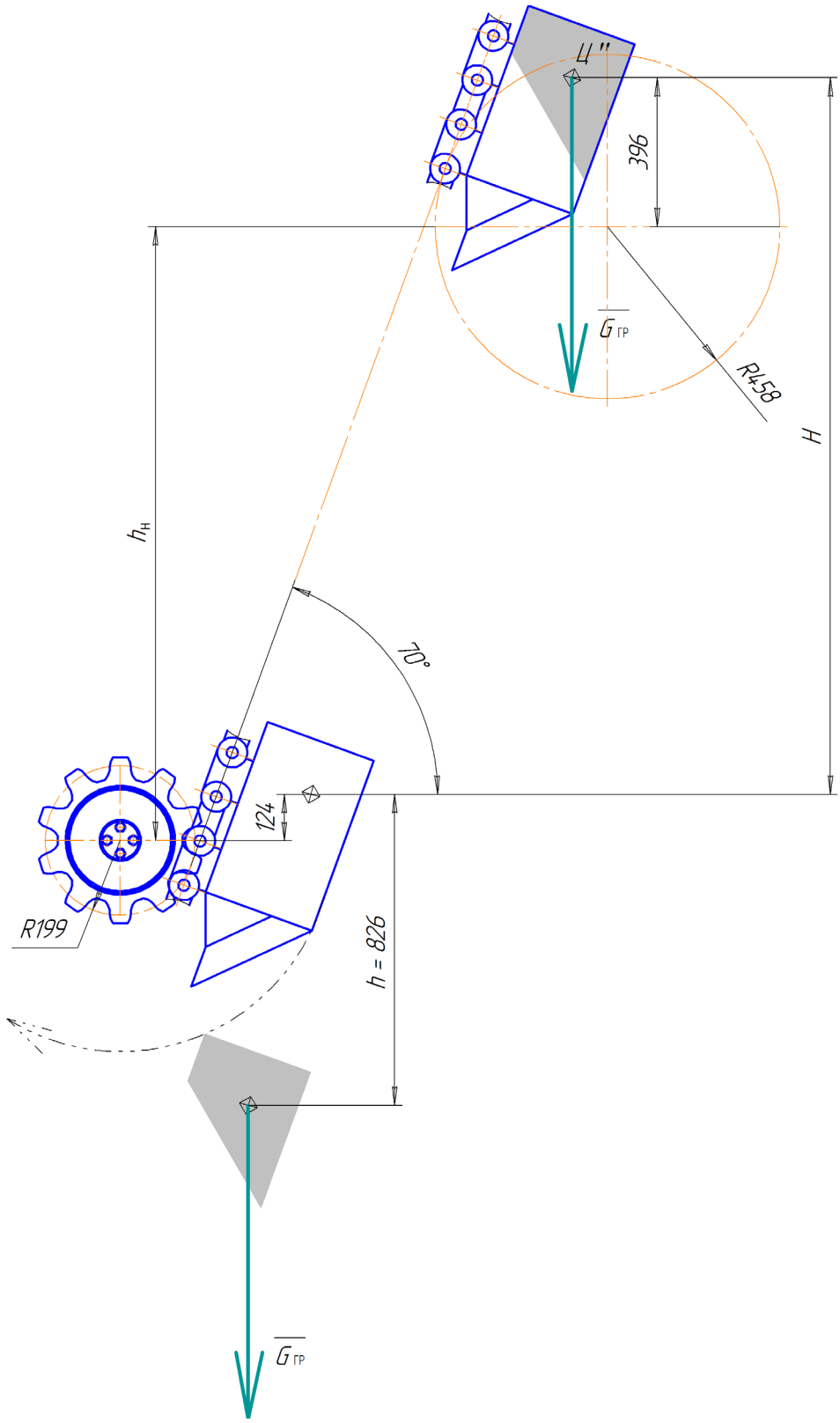

Рисунок 4 – К определению длины нисходящего участка цепей от момента окончания поворота ковша на ведущей звёздочке верхнего привода до момента начала его поворота на нижнем поворотном ролике

Figure 4 – To determine the length of the downward section of the chains from the moment the bucket rotates on the leading star of the upper drive to the moment it starts turning on the lower turn roller

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Тяговое усилие цепей при подъёме грунта равно сумме силы тяжести грунта на участке его подъёма и силы тяжести ковшей совместно с участками цепей, осуществляющих подъём грунта

$$F_{цпг} = G_{пг} + G_{к+ц}. \quad (12)$$

Для учёта прочих сопротивлений перемещению цепей увеличим тяговое усилие на 5%. Общее максимальное тяговое усилие перемещения всех ковшей в период их подъёма

$$F_{цпгmax} = 1{,}05F_{цпг}. \quad (13)$$

Радиус начальной окружности ведущей звёздочки верхнего привода $r_{звп}$, поэтому вращающий момент верхнего привода

$$M_{вп} = F_{цпгmax}r_{звп}. \quad (14)$$

Скорость цепей $v_ц$. Отсюда угловая скорость приводных звёздочек верхнего привода

$$\omega_{вп} = \frac{v_ц}{r_{звп}}. \quad (15)$$

Мощность, необходимая для верхнего привода,

$$N_{вп} = M_{вп}\omega_{вп}. \quad (16)$$

Исходя из передаваемой мощности выберем гидромотор.

Передаточное отношение от гидромотора к верхнему приводу

$$i_{впгп} = \frac{\omega_{гмнп}}{\omega_{вп}}. \quad (17)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объём ковша $V_к = 0{,}1032м^3$ [27], ширина захвата агрегата для удаления грунта с подстилающего слоя автодороги $B = 7м$, толщина срезаемого слоя грунта $h_{сл} = 0{,}25м$, расстояние между ковшами $l_{мк} = 0{,}6м$, скорость агрегата для удаления грунта с подстилающего слоя автодороги $v_а = 0{,}085\,м/с$, скорость цепей $v_ц = 1{,}686\,м/с$. Коэффициент, учитывающий заполнение ковша, с учётом корректировки (1)

$$k_з = \frac{1{,}3\cdot7\cdot0{,}25\cdot0{,}6\cdot0{,}085}{0{,}1032\cdot1{,}686} \approx 0{,}67.$$

Графически определим предельный угол наклона ковша при его перемещении в направлении ведущей звёздочки верхнего привода (см. рисунок 2). На рисунке точка *П* стыка края лезвия нижнего ножа с правой стенкой корпуса ковша. Так как нижний нож установлен под углом 10° [27], условная точка *У* будет соответствовать проекции середины нижнего ножа. Условная площадь проекции полезного объёма ковша *АБВУ* на вид справа $S_{кпр} = 116700мм^2$. С учётом скорректированного коэффициента, учитывающего заполнение ковша, площадь проекции полезного объёма ковша, заполненного грунтом,

$$S_{кпрз} = k_з S_{кпр};$$

$$S_{кпрз} = 0{,}67 \cdot 116700 = 78190мм^2.$$

Из рисунка 2 предельный угол наклона ковша при его перемещении в направлении ведущей звёздочки верхнего привода 49,5°. Установим угол наклона ковша к горизонтали . При перемещении ковша вертикально вверх к поворотному ролику *2* (см. рисунок 1) поверхность грунта в ковше будет приблизительно горизонтальной. При повороте на поворотном ролике *2* за счёт центробежной силы инерции грунт будет смещаться к верхней стенке корпуса ковша. Следовательно, угла наклона ковша к горизонтали 50° при его перемещении в направлении ведущих звёздочек верхнего привода достаточно для гарантированного предотвращения высыпания грунта.

В течение первой фазы поворота ковша на ведущих звёздочках верхнего привода (см. рисунок 3) на грунт, расположенный в ковше, действует сила $G_{гр}$ тяжести, центробежная сила инерции $F_{цб}$ и сила инерции F_j, вызванная торможением грунта в начале поворота. Сила тяжести грунта в ковше $G_{гр} = 833Н$ [27].

Радиус начальной окружности ведущей звёздочки верхнего привода $r_{звп} = 458мм$. Скорость перемещения ковша $v_к = 1{,}686\,м/с$. Тогда угловая скорость вала верхнего привода (2)

$$\omega_{вп} = \frac{1{,}686}{0{,}458} \approx 3{,}681\,рад/с.$$

Центробежная сила инерции (3)

$$F_{цб} = 85 \cdot 3{,}681^2 \cdot 0{,}458 \approx 527Н.$$

Расстояние, на которое переместится центр масс грунта по направлению вектора начальной скорости $l_{грвп} = 563мм$. Время поворота центра масс грунта на угол $\varphi_{гр} = 90° = 1{,}57рад$ (4)

$$\tau_{гр} = \frac{1{,}57}{3{,}681} \approx 0{,}426с.$$

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Ускорение грунта (5)

$$a_{гр} = \frac{0-1,686}{0,426} \approx -3,96\, м/с^2.$$

Масса грунта в ковше $m_к = 85кг$ [27]. Поэтому сила его инерции (6)

$$F_j = -3,96 \cdot 85 = -337Н.$$

Так как сила со знаком минус, она направлена вперёд. Приложим силы к центру масс грунта *Ц* в начале поворота ковша и сложим их. Равнодействующая $F_\Sigma = 733Н$ прижимает грунт в процессе поворота к задней стенке ковша, препятствуя высыпанию грунта.

В течение второй фазы поворота ковша на ведущей звёздочке верхнего привода равнодействующая $F_\Sigma = 343Н$ способствует высыпанию грунта из ковша. Следует заметить, что угол между вертикалью и равнодействующей 20°52' почти равен углу 20° между вертикалью и направлением движения ковша после поворота на ведущей звёздочке верхнего привода. Следовательно, принятый угол между вертикалью и направлением движения ковша после поворота на ведущей звёздочке верхнего привода близок к оптимальному углу.

Из формулы (8) расстояние

$$H = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,826 \cdot (1,686 \cdot 0,94)^2}{9,8}} = 0,65м.$$

Отсюда минимальная разность высот осей ведущей звёздочки верхнего привода и нижнего поворотного ролика (7)

$$h_н = 0,65 - 0,272 = 0,378м.$$

С учётом трения грунта о стенки корпуса ковша эту разность высот увеличим до 500 мм.

Проведённые расчёты позволяют скорректировать конструктивную компоновку верхней части агрегата (см. рисунок 1). Радиус начальной окружности поворотного ролика *7* равен радиусу начальной окружности ведущей звёздочки верхнего привода $r_{звп} = 458мм$. Радиусы начальных окружностей поворотных роликов *2*, *4*, *5*, *6*, выполним равными радиусу начальной окружности ведущей звёздочки *1* нижнего привода $r_н = 200мм$. Получилось расстояние $y = 2250мм$, $z = 4300мм$.

Из рисунка 1 максимальное количество ковшей на участке подъёма грунта $n_{кпг} = 8$. Расчётная масса грунта в одном ковше $m_к = 85кг$ [27]. Масса всего поднимаемого грунта на участке подъёма (9)

$$m_{пг} = 85 \cdot 8 = 680кг.$$

Сила его тяжести (10)

$$G_{пг} = 9,8 \cdot 680 = 6664Н.$$

Сила тяжести ковша $G_к = 570Н$, сила тяжести участка цепей между ковшами принята 100 Н [27]. Тогда сила тяжести ковшей совместно с участками цепей, осуществляющими подъём грунта, (11)

$$G_{к+ц} = 8(570 + 100) = 5360Н.$$

Тяговое усилие цепей при подъёме грунта (12)

$$F_{цпг} = 6664 + 5360 \approx 12024Н.$$

С учётом прочих сопротивлений перемещению цепей общее максимальное тяговое усилие перемещения всех ковшей в период их подъёма (13)

$$F_{цпг\max} = 1,05 \cdot 12024 = 12625Н.$$

Радиус начальной окружности ведущей звёздочки верхнего привода $r_{звп} = 458мм$. Вращающий момент верхнего привода (14) $M_{вп} = 12625 \cdot 0,458 = 5782Нм$.

Скорость цепей $v_ц = 1,686\, м/с$ [27]. Угловая скорость приводных звёздочек верхнего привода (15)

$$\omega_{вп} = \frac{1,686}{0,458} \approx 3,68\, рад/с.$$

Мощность, необходимая для верхнего привода, (16)

$$N_{вп} = 5782 \cdot 3,68 = 21285Вт \approx 21,3кВт.$$

Исходя из передаваемой мощности и для унификации с нижним приводом [27], выберем героторный гидромотор МТ-160, угловая скорость ротора $\omega_{гмнп} = 65\, рад/с$, мощность – 26,5 кВт.

Передаточное отношение от гидромотора к верхнему приводу (17)

$$i_{впмп} = \frac{65}{3,68} \approx 17,663.$$

Необходима установка двухступенчатого планетарного редуктора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых расчётов выявлены геометрические и динамические параметры загружающей части агрегата. В частности, максимальное тяговое усилие перемещения всех ковшей в период их перемещения для

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

выгрузки грунта $F_{цп\max} = 12625H$, вращающий момент верхнего привода $M_{вп} = 5782Нм$, угловая скорость приводных звёздочек верхнего привода $\omega_{вп} = 3{,}68\,рад/с$, мощность, необходимая для верхнего привода, $i_{впмп} = 17{,}663$. Исходя из передаваемой мощности, целесообразно использовать для верхнего привода агрегата героторный гидромотор МТ-160 и двухступенчатый планетарный редуктор с передаточным отношением от гидромотора к звёздочкам . Проведённые расчёты позволили разработать конструкцию элементов загружающей части агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

2. 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.

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

4. Кириллов Ф.Ф. Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многорезцовых рабочих органов землеройных машин // Строительные и дорожные машины. 2010. №11. С. 44–48.

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

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

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

11. 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.

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

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

14. 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.

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

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

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

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

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

20. 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.

21. Пархоменко Г.Г., Пархоменко С.Г. Силовой анализ механизмов перемещения рабочих органов почвообрабатывающих машин по заданной траектории // Тракторы и сельхозмашины. 2018. №1. С. 47–54.

22. 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.

23. Николаев В.А. Определение скорости цепей и размеров пласта грунта, отрезаемого ковшом агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги // Вестник СибАДИ. 2020. №1. С. 32–43.

24. Николаев В.А. Анализ взаимодействия кромки лезвия консольного ножа с грунтом // Вестник СибАДИ. 2020. №2. С. 172–181.

25. Николаев В.А. Затраты энергии на резание грунта ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги // Вестник СибАДИ. 2020. №6. С. 676–688.

REFERENCES

1. Karasyev G.N. Opredelenie sily rezaniya grunta s uchyotom uprugih deformacij pri razrushenii [Determination of the cutting force of the soil, taking into account elastic deformations during destruction] *Construction and road machinery*, 2008. 4: 36-42. (In Russian)

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

2. Karnaukhov A.I.. Orlovskiy S.N Opredelenie zatrat udel'noj energii na process rezaniya lesnyh pochv torcevymi frezam [Determination of the cost of specific energy for the process of cutting forest soils with end mills]. *Construction and road machinery*, 2010. 1: 20-22. (In Russian)

3. Kravets I.M. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezaniya pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezo [Determination of the critical cutting depth for combined cutting of soils with a hydrophreeze]. *Construction and road machinery*, 2010. 5: 47-49. (In Russian)

4. Kirillov F.F. Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo usiliya dlya mnogorezcovyh rabochih organov zemlerojnyh mashin[Deterministic mathematical model of the time distribution of traction force for multi-cutter working bodies of earthmoving machines]. *Construction and road machinery*, 2010. 11: 44-48. (In Russian)

5. Berestov E.I. Vliyanie treniya grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniyu[Effect of soil friction on the knife surface on the cutting resistance]. *Construction and road machinery*, 2010. 11: 34-38. (In Russian)

6. Vershinin A.V., Subov V.S., Tyulnev A.M. Povyshenie effektivnosti diskofrezernyh rabochih mekhanizmov dlya razrabotki myorzlyh gruntov [Improving the efficiency of disc-milling working mechanisms for the development of frozen soils]. *Construction and road machinery*, 2012. 8: 42-44. (In Russian)

7. Balovnev V.I., Nguen Z.SH. Opredelenie soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelyu prochnosti [Determination of resistances in the development of soils with a ripper according to the integral strength index]. *Construction and road machines*, 2005. 3: 38-40. (In Russian)

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

9. 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.

10. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. Cold Regions Science and Technology. 2013. 86: 142-166.

11. 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.

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

13. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007: 448.

14. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.YU. Issledovanie upravlyaemyh nozhevyh sistem zemlerojno-transportnyh mashin [Research of controlled knife systems of earthmoving and transport machines]. *Construction and road vehicles*, 2017. 2: 12-15.

15. Nilov V.A., Fyodorov E.V. Razrabotka grunta skreperom v usloviyah svobodnogo rezaniya [Development of the soil with a scraper in the conditions of free cutting]. Construction and road machines, 2016. 2: 7-10.

16. CHmil' V.P. Nasosno-akkumulyativnyj privod ryhlitelya s avtomaticheskim vyborom ugla rezaniya [Pump-accumulator drive of the ripper with automatic selection of the cutting angle]. *Construction and road machines*, 2016. 11: 18-20.

17. Kabashev R.A., Turgumbaev S.D. Eksperimental'nye issledovaniya processa kopaniya gruntov rotorno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [Experimental studies of the process of soil digging by rotary-disk working bodies under hydrostatic pressure]. *The The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2016. 4: 23-28. (In Russian)

18. Syomkin D.S. O vliyanii skorosti rabochego organa na silu soprotivleniya rezaniyu grunta [On the influence of the speed of the working body on the strength of the resistance to cutting the soil]. *The The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2017. 1: 37-43. (In Russian)

19. Konstantinov YU.V. Metodika raschyota soprotivleniya i momenta soprotivleniya rezaniyu pochvy pryamym plastinchatym nozhom frezy [Method of calculating the resistance and moment of resistance to cutting the soil with a straight plate cutter knife]. *Tractors and agricultural machines*, 2019. 5: 31-39. (In Russian)

20. 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 composition of the working bodies of the rotary tillage loosening and separating machine]. *Tractors and agricultural machines*, 2018. 5: 32-39. (In Russian)

21. 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 tillage machines along a given trajectory]. *Tractors and agricultural machines*, 2018. 1: 47-54. (In Russian)

22. Dranyaev S.B., CHatkin M.N., Koryavin S.M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvayushchej frezy [Simulation of the operation of a screw L-shaped knife of a tillage cutter]. *Tractors and agricultural machines*, 2017. 7: 13-19. (In Russian)

23. Nikolayev V.A. Opredelenie skorosti cepej i razmerov plasta grunta, otrezaemogo kovshom agregata dlya udaleniya verhnego sloya grunta s podstilayushchego sloya avtodorogi [Determination of the speed of the chains and the size of the soil layer cut by the bucket of the unit to remove the top layer of soil from the underlying layer of the road]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020. 1:. 32-43. (In Russian)

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

24. Nikolayev V.A. Analiz vzaimodejstviya kromki lezviya konsol'nogo nozha s gruntom [Analysis of the interaction of the edge of the cantilever knife blade with the ground]. *The The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020. 2: 172-181. (In Russian)

25. Nikolaev V.A. Zatraty jenergii na rezanie grunta kovshami agregata nepreryvnogo dejstvija dlja formirovanija podstilajushhego sloja avtodorogi [Energy Expenditure on ground cutting by buckets of the unit of continuous action to form the underlying layer of the road]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020. 6: 676-688. (In Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88, e-mail: Nikolaev53@inbox.ru).

Vladimir A. Nikolaev, Dr. of Sci., Professor of Construction and Road Machines Department, Yaroslavl Technical University. Yaroslavl, Moscow Avenue, 88. e-mail: Nikolaev53@inbox.ru

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal