УДК 625.08
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-3-340-350

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТИ КОНСОЛЬНОГО НОЖА С ГРУНТОМ

В.А. Николаев
ФГБОУ ВО ЯТУ,
г. Ярославль, Россия
Nikolaev53@inbox.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. *В условиях России использование для удаления верхнего слоя грунта технических средств циклического действия нецелесообразно. Проблема ускорения строительства автодорог, повышения их качества может быть решена путём применения агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя. Основными рабочими органами агрегата являются ковши, включающие нижние ножи, правые ножи и консольные ножи. Консольный нож содержит кромку лезвия, переднюю фаску лезвия, поверхность и нижнюю плоскость. Анализ взаимодействия с грунтом элементов консольного ножа агрегата непрерывного действия представляет теоретический и практический интерес.*

Методика исследования. *Заменено последовательное воздействие на грунт многих консольных ножей в пределах ширины захвата агрегата воздействием на грунт одного условного консольного ножа на расстоянии, необходимом для разработки одного кубического метра грунта. Силы взаимодействия условного консольного ножа с грунтом названы условными силами. Приведена методика расчёта затрат энергии при внедрении консольного ножа в грунт: на преодоление напора грунта на переднюю фаску консольного ножа, на подъём грунта, на вертикальное ускорение грунта передней фаской, на преодоление трения грунта о переднюю фаску и преодоления трения грунта о нижнюю плоскость консольного ножа. Общие затраты энергии при взаимодействии консольного ножа с грунтом объёмом один кубический метр получены сложением частных затрат энергии.*

Результаты. *На основе разработанной методики рассчитаны затраты энергии при внедрении консольного ножа в грунт: на преодоление напора грунта на переднюю фаску консольного ножа, на подъём грунта, на вертикальное ускорение грунта передней фаской, на преодоление трения грунта о переднюю фаску и преодоления трения грунта о нижнюю плоскость консольного ножа. Определены общие затраты энергии и их структура при взаимодействии консольного ножа с грунтом объёмом один кубический метр. Определена горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения консольного ножа.*

Заключение. *Суммарная энергия, необходимая для резания грунта консольными ножами около 20 кДж/ куб.м. При этом затраты энергии на взаимодействие кромок лезвий консольных ножей с грунтом около 7 тыс. Дж/куб.м, на взаимодействие фасок лезвий консольных ножей с грунтом около 6 тыс. Дж/куб.м, на преодоление трения грунта о нижнюю плоскость консольного ножа 7 тыс. Дж/куб.м. Для определения общих затрат энергии на резание грунта ковшами агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги нужно проанализировать взаимодействие с грунтом других элементов ковша.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *автомобильная дорога, агрегат непрерывного действия, грунт, консольный нож, затраты энергии, горизонтальная продольная сила.*

Поступила 02.06.2020, принята к публикации 30.06.2020.
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Николаев В.А. Анализ взаимодействия поверхности консольного ножа с грунтом. *Вестник СибАДИ. 2020;* 17 (3): https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-3-340-350

© Николаев В.А.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-3-340-350

INTERACTION ANALYSIS OF THE CONSOLE KNIFE SURFACE WITH THE SOIL

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

ABSTRACT

Introduction. *In Russia the use of cyclical equipment to remove the top layer of the soil is not feasible. The problem of the roads construction accelerating, improving their quality can be solved by applying a continuous action unit to form a litter layer. The main working bodies of the unit are buckets, including lower knives, right knives and console knives. A console knife contains the edge of the blade, the front face of the blade, the surface and the lower plane. The analysis of the interaction with the ground elements of the continuous action unit console knife is of theoretical and practical interest.*
The method of research. *A consistent impact of many console knives on the ground within the width of the capture unit by the impact of one conventional console knife on the ground at a distance needed to develop one cubic meter of soil is replaced. The interaction forces of the conventional console knife with the ground are called conventional forces. The method of calculating energy costs when introducing a console knife into the ground is presented: to overcome the pressure of the ground on the front face of the console knife, to lift the ground, to vertical acceleration of the soil of the front bevel, to overcome the friction of the ground on the front face and to overcome the friction of the ground on the lower plane of the console knife. The total energy costs of the interaction of the console knife with the ground volume of one cubic meter are obtained by the addition of private energy expenditures.*
Results. *On the basis of the developed method, energy costs are calculated when introducing a console knife into the ground: to overcome the pressure of the ground on the front face of the console knife, to lift the ground, to vertical acceleration of the soil of the front bevel, to overcome the friction of the ground on the front face and to overcome the friction of the ground on the lower plane of the console knife. The total energy costs and their structure when the console knife interacts with the ground volume of one cubic meter are defined. The horizontal longitudinal force needed to move the console knife has been determined.*
Conclusion. *The total energy needed to cut the ground with console knives is about 20 kJ/cub.m. At the same time energy costs for the interaction of console knives blades edges with soil about 7,000 J/cub.m, on the interaction of the packing console knives blades with the ground about 6,000 J/cub.m, to overcome the ground friction on the lower plane of the console knife 7, 000 J/cub.m. To determine the total energy costs of cutting the ground with buckets of the unit to remove the top layer of the soil from the underlying layer of the road, the interaction with the soil of other elements of the bucket is necessary to be analyzed.*

KEYWORDS: *road, continuous action unit, ground, console knife, energy costs, horizontal longitudinal force.*

Submitted 02.06.2020, revised 30.06.2020.
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: Nikolaiev V.A. Interaction analysis of the console knife surface with the soil. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (3): https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-3-340-350

© Nikolaiev V. A.

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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1) определены затраты энергии: на преодоление напора грунта на переднюю фаску консольного ножа, на подъём грунта, на вертикальное ускорение грунта передней фаской, на преодоление трения грунта о переднюю фаску и преодоления трения грунта о нижнюю плоскость консольного ножа;

2) определены общие затраты энергии при взаимодействии консольного ножа с грунтом в период разработки грунта объёмом один кубический метр;

3) выявлена структура затрат энергии при взаимодействии консольного ножа с грунтом;

4) определена горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения консольного ножа.

ВВЕДЕНИЕ

Чтобы автомобильная дорога была долговечной, следует тщательно удалить верхний слой грунта, не затрагивая грунт, расположенный под верхним слоем. Обычно эту работу выполняют бульдозерами, экскаваторами и другими техническими средствами циклического действия. Эти технические средства универсальны, но их производительность ограничена. В странах с малой протяжённостью строящихся автодорог ограниченная производительность технических средств циклического действия при удалении верхнего слоя грунта оказывает относительно небольшое влияние на время строительства и затраты на строительство. В сравнении с другими странами в России имеется большая потребность в строительстве автодорог большой протяжённости. Кроме того, в связи с суровым климатом невозможно вести качественно земляные работы в зимний период. В таких условиях использование для удаления верхнего слоя грунта технических средств циклического действия нецелесообразно. Проблема ускорения строительства автодорог, повышения их качества может быть решена путём применения агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя [1, 2].

Основными рабочими органами этого агрегата являются ковши, которые отрезают пласт грунта снизу и сбоку. При этом нижнее лезвие отрезает слой грунта снизу, правое лезвие – сбоку, а лезвие консольного ножа частично подрезает верхний слой грунта снизу для следующего ковша. Все ножи легкосъёмные. Геометрические параметры ковша получены из конструктивной компоновки агрегата [2]. Консольный нож содержит кромку лезвия, переднюю фаску лезвия, поверхность и нижнюю плоскость. Так как лезвие консольного ножа расположено под углом 45° к направлению перемещения ковша, происходит резание грунта со скольжением. При этом угол заострения лезвия консольного ножа в продольно-вертикальной плоскости, то есть в направлении движения агрегата, будет значительно меньше угла его заточки, измеренного в вертикальной плоскости, перпендикулярной лезвию.

Теоретические основы резания грунта весьма подробно рассмотрены [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27]. Однако авторы применяют преимущественно синтезный метод, рассматривая рабочий орган в целом. Недостаток этого метода заключён в сложности оценки частных затрат энергии при работе каждого элемента рабочего органа. Не зная величины частных затрат энергии при работе каждого элемента рабочего органа, их увеличение или уменьшение при изменении величины того или иного геометрического параметра элемента рабочего органа, сложно осмысленно его совершенствовать. Поэтому часто совершенствуют рабочие органы интуитивно. Взаимодействие кромки лезвия консольного ножа с грунтом проанализировано [2]. Анализ взаимодействия с грунтом других элементов консольного ножа агрегата непрерывного действия представляет теоретический и практический интерес.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Разделим консольный нож на элементы. Проведём анализ взаимодействия этих элементов с грунтом. Существуют два способа определения затрат энергии на перемещение рабочего органа в грунте [27]. Воспользуемся способом, который состоит в выявлении условных сил и затрат энергии при разработке одного кубического метра грунта. Заменим последовательное воздействие на грунт многих консольных ножей в пределах ширины захвата агрегата воздействием на грунт одного условного консольного ножа на расстоянии, необходимом для разработки одного кубического метра грунта. Силы взаимодействия условного консольного ножа с грунтом назовём условными силами. Установлено [27], что резание грунта лезвием происходит микроотрывами. Поэтому для определения мгновенных значений сил выявленные условные силы приводят к расстоянию одного микроотрыва.

Чтобы определить условные силы при разработке одного кубического метра грунта, приложенные к консольному ножу, следует выявить составляющие затрат энергии на реза-

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ние. При внедрении консольного ножа в грунт существуют затраты энергии (за исключением затрат энергии на взаимодействие с грунтом кромки лезвия):

- на преодоление напора грунта на переднюю фаску консольного ножа;
- на подъём грунта;
- на вертикальное ускорение грунта передней фаской;
- на преодоление трения грунта о переднюю фаску;
- на преодоление трения грунта о поверхность консольного ножа;
- на преодоление трения грунта о нижнюю плоскость консольного ножа.

Затраты энергии на преодоление напора грунта на переднюю фаску консольного ножа

На основании относительности движения допустим, что не консольный нож преодолевает сопротивление грунта, а грунт набегает на консольный нож со скоростью $v_к$. Заменим постепенное воздействие грунта на нож одномоментным воздействием всей массы, сосредоточенной в слое при разработке одного кубического метра грунта. Мгновенная сила $F_{г-конс}$ набегающего грунта равна силе его инерции

$$F_{г-конс} = am_{г-к} = \rho \frac{V_{г-к}}{\tau_{г-к}}(v_к - v_{кон}), \quad (1)$$

где ρ – плотность грунта. Если учитывать только объём грунта, непосредственно воздействующего на переднюю фаску консольного ножа в секунду, то

$$\frac{V_{г-к}}{\tau_{г-к}} = b_к h_к v_к,$$

где $b_к$ – ширина захвата консольного ножа; $h_к$ – толщина консольного ножа.

Поскольку затратами энергии на деформацию части массива грунта пренебрегли [3], то для расчёта затрат энергии на преодоление напора грунта на переднюю фаску консольного ножа примем как объём грунта, непосредственно воздействующего на переднюю фаску консольного ножа, так и объём грунта, расположенного выше консольного ножа, то есть грунта, сечение которого заключено в прямоугольнике *ACDE* (рисунок 1). Поэтому

$$\frac{V_{г-к}}{\tau_{г-к}} = b_к h_{сл} v_к, \quad (2)$$

где $h_{сл} = 250мм$ – максимальная глубина срезаемого слоя грунта.

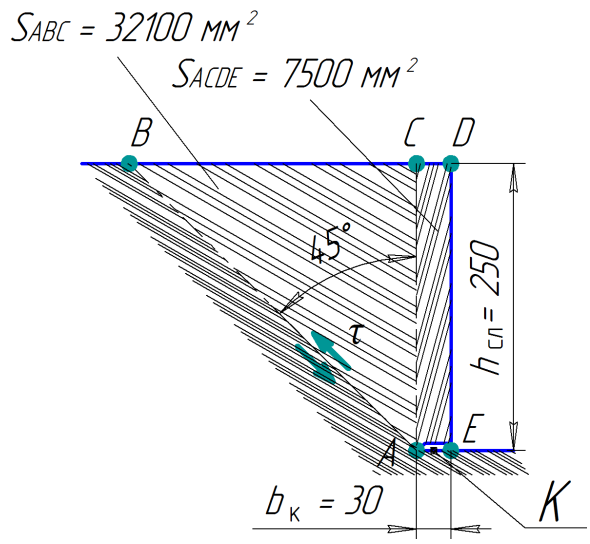

Рисунок 1 – К определению сечения грунта, воздействующего на переднюю фаску консольного ножа

Figure 1 – To determine the cross-section of the soil that effects on the front bevel of the console knife

Масса грунта, воздействующего на переднюю фаску консольного ножа в секунду,

$$m_{г-к} = \rho \frac{V_{г-к}}{\tau_{г-к}}. \quad (3)$$

Конечная горизонтальная скорость набегающего грунта зависит от многих факторов. Допустим, конечная горизонтальная скорость набегающего грунта $v_{кон} = 0$. Тогда мгновенная сила $F_{г-конс}$ набегающего грунта

$$F_{г-конс} = m_{г-к}(v_к - v_{кон}) = m_{г-к} v_к, \quad (4)$$

где $v_к$ – скорость ковша или скорость, с которой грунт набегает на консольный нож.

Суммарная сила воздействия грунта, набегающего на переднюю фаску консольного ножа, при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$F_{Σг-конс} = F_{г-конс}\tau_к, \quad (5)$$

где $\tau_к$ – время перемещения ковша на расстояние $s_к$ при разработке грунта объёмом один кубический метр.

Энергия на преодоление напора грунта на переднюю фаску консольного ножа

$$u_{г-конс} = F_{г-конс} s_к. \quad (6)$$

Затраты энергии на подъём грунта консольным ножом

Если бы пласт грунта был отделён от его массива, то энергия, необходимая для подъё-

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ма грунта, являлась бы потенциальной энергией подъёма груза на высоту $h_к$, равную толщине консольного ножа. Сложность определения энергии, необходимой для подъёма грунта, заключена в том, что, с одной стороны, пласт грунта не отделён от его массива. Поэтому следовало бы учитывать общую площадь сечения участка грунта, на который воздействует консольный нож (см. рисунок 1): $S_{общ} = 7500 + 32100 = 39600 мм^2$.

С другой стороны, подъёма участка грунта почти не происходит. Происходит преимущественно накопление в грунте упругого потенциала. Поэтому примем площадь сечения участка грунта, на который воздействует консольный нож, только $S_{ACDE} = 7500 мм^2$. Объём грунта, поднимаемый консольным ножом, $V_{под} = 1 м^3$. Объёмная масса грунта ρ. Масса грунта, поднимаемого консольным ножом,

$$m_{под} = \rho V_{под}. \quad (7)$$

Условная сила, необходимая для подъёма грунта объёмом один кубический метр консольным ножом

$$F_{подконс} = m_{под} g, \quad (8)$$

где $g = 9{,}8\ м/с^2$.

Энергия, необходимая для подъёма грунта консольным ножом,

$$u_{подконс} = m_{под} g h_к. \quad (9)$$

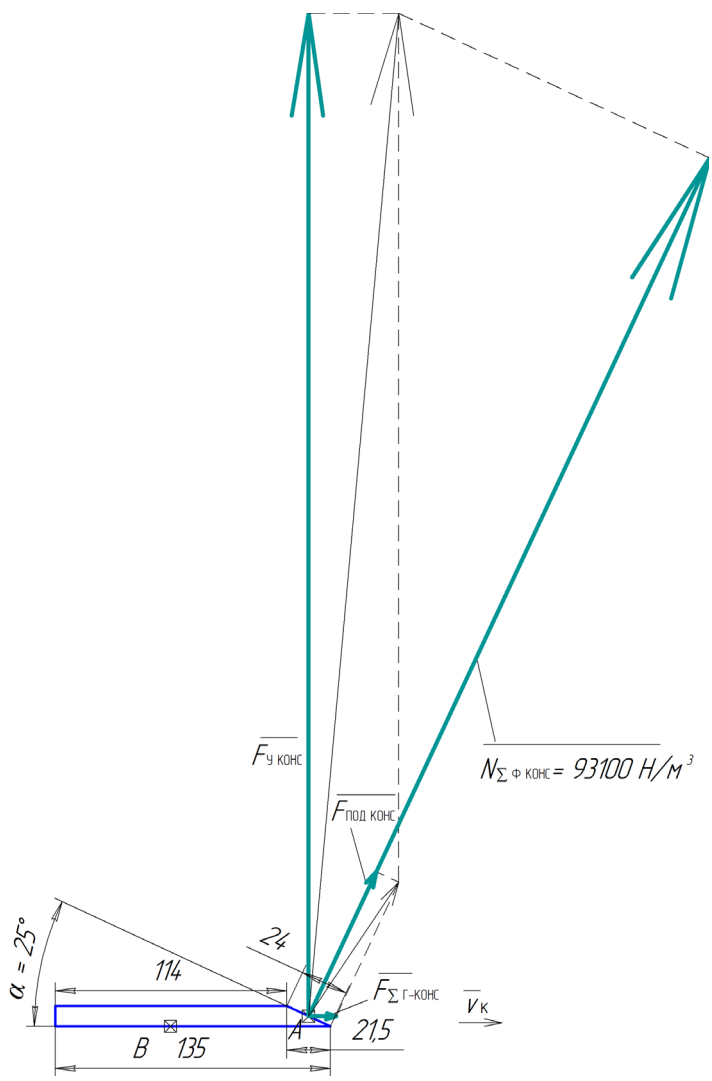

Рисунок 2 – Схема условных сил воздействия консольного ножа на грунт в продольно-вертикальной плоскости

Figure 2 – Conventional forces scheme of the console knife impact on the soil in a longitudinal vertical plane

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Придадим (рисунок 2) условной силе, необходимой для подъёма грунта объёмом один кубический метр консольным ножом, направление под углом трения стали по грунту $\varphi_{\text{с-г}}$ в плоскости, перпендикулярной плоскости передней фаски консольного ножа. Из пространственной модели [3] проекции сил $F_{\text{отрконс}} + F_{\text{щконс}}$ на оси

$$F_{\text{к}x} = 0{,}389\left(F_{\text{отрконс}} + F_{\text{щконс}}\right);$$

$$F_{\text{к}y} = 0{,}389\left(F_{\text{отрконс}} + F_{\text{щконс}}\right);$$

$$F_{\text{к}z} = 0{,}834\left(F_{\text{отрконс}} + F_{\text{щконс}}\right).$$

По аналогии определим проекции условной силы $F_{\text{подконс}}$:

$$F_{\text{подк}x} = 0{,}389F_{\text{подконс}};$$

$$F_{\text{подк}y} = 0{,}389F_{\text{подконс}}; \quad (10)$$

$$F_{\text{подк}z} = 0{,}834F_{\text{подконс}}.$$

Затраты энергии на вертикальное ускорение грунта передней фаской консольного ножа

Передняя фаска консольного ножа не только поднимает грунт, расположенный над консольным ножом, но и придаёт ему вертикальное ускорение. Масса грунта, ускоряемого консольным ножом при разработке одного кубического метра грунта, $m_{\text{у}} = m_{\text{под}} = 1600\text{кг}$. Условная сила для создания вертикального ускорения грунта консольным ножом

$$F_{\text{уконс}} = m_{\text{у}} a_{\text{верт}}. \quad (11)$$

Начальная вертикальная скорость грунта равна нулю: $v_{\text{начверт}} = 0$. Скорость ковша $v_{\text{к}}$. Она направлена горизонтально. Конечную вертикальную скорость грунта определим из рисунка 2:

$$v_{\text{конверт}} = v_{\text{к}} tan\alpha. \quad (12)$$

Горизонтальная проекция фаски консольного ножа $21{,}5\text{мм} = 0{,}0215\text{м}$ (см. рисунок 2). Время перемещения консольного ножа по грунту на это расстояние

$$\tau_{\text{ф}} = \frac{0{,}0215}{v_{\text{к}}}. \quad (13)$$

Вертикальное ускорение грунта

$$a_{\text{верт}} = \frac{v_{\text{конверт}} - v_{\text{начверт}}}{\tau_{\text{ф}}}. \quad (14)$$

Энергия, необходимая для вертикального ускорения грунта консольным ножом,

$$u_{\text{уконс}} = \frac{m_{\text{у}} {v_{\text{конверт}}}^2}{2}. \quad (15)$$

Затраты энергии на преодоление трения грунта о переднюю фаску консольного ножа

На рисунке 2 показана схема условных сил воздействия передней фаски консольного ножа на грунт в продольно-вертикальной плоскости, при разработке грунта объёмом один кубический метр. Условную силу, равную силе воздействия грунта, набегающего на переднюю фаску консольного ножа $F_{\Sigma\text{г-конс}}$, направим по ходу ножа. Проекцию условной силы подъёма грунта консольным лезвием $F_{\text{подпр-в}}$ направим перпендикулярно проекции фаски на продольно-вертикальную плоскость. Вектор силы взят из пространственной модели [3]. Суммарное усилие для создания вертикального ускорения грунта консольным ножом $F_{\text{уконс}}$ направим вертикально.

Сложим эти силы и определим равнодействующую. Затем равнодействующую спроецируем на нормаль к фаске и определим условную нормальную реакцию фаски на воздействие грунта. Приведенная нормальная реакция передней фаски консольного ножа к расстоянию $l_{\text{отр}}$:

$$N_{\text{фконс}} = N_{\Sigma\text{фконс}} \frac{l_{\text{отр}}}{s_{\text{к}}}. \quad (16)$$

Сила трения грунта о переднюю фаску консольного ножа

$$F_{\text{тфконс}} = f_{\text{с-г}} N_{\text{фконс}}. \quad (17)$$

Энергия на преодоление трения грунта о переднюю фаску консольного ножа

$$u_{\text{тфконс}} = F_{\text{тфконс}} s_{\text{к}}. \quad (18)$$

Затраты энергии на преодоление трения грунта о поверхность консольного ножа

Из приведенных расчётов слой грунта от воздействия фаски консольного ножа приобретает вертикальное ускорение $a_{\text{верт}} = 61{,}66\ \text{м/с}^2$. Определим параметры полёта пласта грунта [27]. Представим частицу грунта материальной точкой, пущенной с фаски консольного ножа под углом к горизонту. Из уравнения $g\tau_{\text{д}}^2 - 2v_{\text{конверт}}\tau_{\text{д}} = 0 \rightarrow g\tau_{\text{д}} - 2v_{\text{конверт}} = 0$ определим время полёта частицы грунта, в течение которого она опустилась бы

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

до уровня поверхности консольного ножа $\tau_д = \frac{2v_{конверт}}{g}$; $\tau_д = \frac{2 \cdot 0{,}7862}{9{,}8} = 0{,}16с$.

За это время консольный нож преодолеет расстояние

$$s_д = v_к \tau_д;\ s_д = 1{,}686 \cdot 0{,}16 \approx 0{,}27м = 270мм.$$

Из рисунка 2 длина поверхности консольного ножа с учётом его скоса 144 мм. Поэтому грунт перелетит через консольный нож. Затраты энергии на преодоление трения грунта о поверхность консольного ножа равны нулю.

Энергия, необходимая для преодоления трения грунта о нижнюю плоскость консольного ножа

Сложим все условные вертикальные силы: $F_{кz}$, $F_{подкz}$, $F_{уконс}$. Совокупная условная вертикальная равнодействующая сила равна сумме этих сил

$$F_{\Sigma конс z} = F_{кz} + F_{подкz} + F_{уконс}. \quad (19)$$

Приведём условную вертикальную равнодействующую силу к расстоянию $l_{отр}$:

$$F_{конс z} = F_{\Sigma конс z} \frac{l_{отр}}{s_к}. \quad (20)$$

Силу $F_{тфконс}$ трения грунта о переднюю фаску консольного ножа следует разложить на горизонтальную и вертикальную составляющие

$$F_{тфконс x} = F_{тфконс} cos25°. \quad (21)$$

$$F_{тфконс z} = F_{тфконс} sin25°. \quad (22)$$

Нормальная реакция нижней плоскости консольного ножа равна сумме вертикальных сил

$$N_{нпконс} = F_{конс z} + F_{тфконс z}. \quad (23)$$

Сила трения грунта о нижнюю плоскость консольного ножа

$$F_{тнпконс} = f_{с-г} N_{нпконс}. \quad (24)$$

Энергия на преодоление трения грунта о нижнюю плоскость консольного ножа

$$u_{тнпконс} = F_{тнпконс} s_к. \quad (25)$$

Суммарные затраты энергии на перемещение консольного ножа, горизонтальная сила для перемещения консольного ножа

Составляющие затрат энергии кромки лезвия консольного ножа вычислены ранее [3]. Суммарная энергия, необходимая для резания грунта консольным ножом

$$u_{конс} = u_{отрконс} + u_{щконс} + u_{ткрконс} + u_{г-конс} + \\ + u_{подконс} + u_{уконс} + u_{тфконс} + u_{тнпконс}. \quad (26)$$

Сложив условные поперечные силы $F_{кy}$ и $F_{подкy}$, определим суммарную условную поперечную силу. Условная поперечная сила $F_{кy}$ вычислена ранее [3].

$$F_{\Sigma конс y} = F_{кy} + F_{подкy}. \quad (27)$$

Приведём суммарную условную поперечную силу к расстоянию $l_{отр}$:

$$F_{конс y} = F_{\Sigma конс y} \frac{l_{отр}}{s_к}. \quad (28)$$

Сложив условные горизонтальные продольные силы $F_{кx}$, $F_{\Sigma г-конс}$, $F_{\Sigma г-конс}$, определим суммарную условную горизонтальную силу. Условная горизонтальная сила $F_{кy}$ вычислена ранее [3].

$$F_{\Sigma конс x} = F_{кx} + F_{\Sigma г-конс} + F_{\Sigma г-конс}. \quad (29)$$

Приведём суммарную условную горизонтальную силу к расстоянию $l_{отр}$:

$$F_{конс x} = F_{\Sigma конс x} \frac{l_{отр}}{s_к}. \quad (30)$$

Кроме этих горизонтальных сил имеются: горизонтальная сила $F_{ткрконс}$ трения кромки лезвия, горизонтальная составляющая $F_{тфконс x}$ силы трения передней фаски, $F_{тнпконс}$ сила трения нижней поверхности консольного ножа о грунт. Горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения консольного ножа, равна сумме всех горизонтальных сил

$$F_{\Sigma кон x} = F_{конс x} + F_{ткрконс} + F_{тфконс x} + F_{тнпконс}; \quad (31)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Известные результаты предыдущих расчётов [2]: ширина захвата лезвия консольного ножа $b_к = 30мм$, толщина консольного ножа $h_к = 10мм = 0{,}01м$, максимальная глубина срезаемого слоя грунта $h_{сл} = 0{,}25м$, скорость ковша $v_к = 1{,}686\ м/с$. Для разработки одного кубического метра грунта консольный нож должен переместиться на расстояние [3] $s_к = 133\ м/м^3$. Время перемещения ковша

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

на расстояние $s_к$ $\tau_к = 78{,}885\ с/м^3$. Допустим, плотность грунта $\rho = 1600\frac{кг}{м^3}$.

Объём грунта, воздействующего на переднюю фаску консольного ножа в секунду (2) (см. рисунок 1):

$$\frac{V_{г-к}}{\tau_{г-к}} = 0{,}03 \cdot 0{,}25 \cdot 1{,}686 \approx 0{,}012645\ м^3/с.$$

Масса грунта, воздействующего на переднюю фаску консольного ножа в секунду (3):

$$m_{г-к} = 1600 \cdot 0{,}012645 \approx 20{,}2\ кг/с.$$

Допустим, конечная горизонтальная скорость набегающего грунта $v_{кон} = 0$. Мгновенная сила набегающего грунта (4):

$$F_{г-конс} = 20{,}2 \cdot 1{,}686 \approx 34{,}1\ Н/с.$$

Условная сила воздействия грунта, набегающего на переднюю фаску консольного ножа, при разработке грунта объёмом один кубический метр (5):

$$F_{\Sigma г-конс} = 34{,}1 \cdot 78{,}885 \approx 2690\ Н/м^3.$$

Энергия на преодоление напора грунта на переднюю фаску консольного ножа (6):

$$u_{г-конс} = 34{,}1 \cdot 133 = 4535\ Дж/м^3.$$

Объём грунта, поднимаемый консольным ножом, $V_{под} = 1м^3$. Объёмная масса грунта $\rho = 1600\ кг/м^3$. Масса грунта, поднимаемого консольным ножом (7):

$$m_{под} = 1600 \cdot 1 = 1600кг.$$

Условная сила подъёма грунта консольным ножом (8):

$$F_{подконс} = 1600 \cdot 9{,}8 \approx 15680\ Н/м^3.$$

Энергия, необходимая для подъёма грунта консольным ножом (9):

$$u_{подконс} = 1600 \cdot 9{,}8 \cdot 0{,}01 \approx 157\ Дж/м^3.$$

Проекции условной силы $F_{подконс}$ (10):

$$F_{подкx} = 0{,}389 \cdot 15680 = 6100\ Н/м^3;$$
$$F_{подку} = 0{,}389 \cdot 15680 = 6100\ Н/м^3;$$
$$F_{подкz} = 0{,}834 \cdot 15680 = 13077\ Н/м^3.$$

Скорость ковша $v_к = 1{,}686\ м/с$. Конечная вертикальная скорость грунта (12):

$$v_{конверт} = 1{,}686 \cdot tan25° = 0{,}7862\ м/с.$$

Время перемещения консольного ножа по грунту на это расстояние (13):

$$\tau_ф = \frac{0{,}0215}{1{,}686} = 0{,}01275с.$$

Вертикальное ускорение грунта (14):

$$a_{верт} = \frac{0{,}7862-0}{0{,}01275} = 61{,}66\ м/с^2.$$

Условная сила для создания вертикального ускорения грунта консольным ножом (11):

$$F_{уконс} = 1600 \cdot 61{,}66 = 98656\ Н/м^3.$$

Энергия, необходимая для вертикального ускорения грунта консольным ножом (15):

$$u_{уконс} = \frac{1600 \cdot 0{,}7862^2}{2} \approx 494\ Дж/м^3.$$

Из рисунка 2 условная нормальная реакция фаски консольного ножа $N_{\Sigma фконс} = 93100\ Н/м^3$. Приведенная нормальная реакция передней фаски консольного ножа к расстоянию $l_{отр} = 0{,}018м$ (16):

$$N_{фконс} = 93100\frac{0{,}018}{133} = 12{,}6Н.$$

Примем коэффициент трения грунта о сталь $f_{с-г} = 0{,}5$. Сила трения грунта о переднюю фаску консольного ножа (17):

$$F_{тфконс} = 0{,}5 \cdot 12{,}6 = 6{,}3Н.$$

Энергия на преодоление трения грунта о переднюю фаску консольного ножа (18):

$$u_{тфконс} = 6{,}3 \cdot 133 = 838\ Дж/м^3.$$

Условные вертикальные силы:

$$F_{кz} = 623400\ Н/м^3\ F_{подкz} = 13077\ Н/м^3;$$
$$F_{уконс} = 98656\ Н/м^3.$$

Совокупная условная вертикальная равнодействующая сила (19):

$$F_{\Sigma конс z} = 623400 + 13077 + 98656 =$$
$$= 735133\ Н/м^3.$$

Приведенная вертикальная равнодействующая сила к расстоянию $l_{отр}$ (20):

$$F_{конс z} = 735133\frac{0{,}018}{133} = 99{,}5Н.$$

Горизонтальная составляющая силы $F_{тфконс}$ трения грунта о переднюю фаску консольного ножа (21):

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

$$F_{\text{тфконс}x} = 6{,}3 \cdot 0{,}906 = 5{,}7\text{Н}.$$

Вертикальная составляющая силы $F_{\text{тфконс}}$ трения грунта о переднюю фаску консольного ножа (22):

$$F_{\text{тфконс}z} = 6{,}3 \cdot 0{,}42 = 2{,}66\text{Н}.$$

Нормальная реакция нижней плоскости консольного ножа (23):

$$N_{\text{нпконс}} = 99{,}5 + 2{,}66 \approx 102\text{Н}.$$

Сила трения грунта о нижнюю плоскость консольного ножа (24):

$$F_{\text{тнпконс}} = 0{,}5 \cdot 102 \approx 52\text{Н}.$$

Энергия на преодоление трения грунта о нижнюю плоскость консольного ножа (25):

$$u_{\text{тнпконс}} = 52 \cdot 133 = 6916\,\text{Дж/м}^3.$$

Составляющие затрат энергии кромки лезвия консольного ножа вычислены ранее [3]. Суммарная энергия, необходимая для резания грунта консольными ножами (26):

$$u_{\text{конс}} = 480 + 287 + 6185 + 4535 + \\ +157 + 494 + 838 + 7050 = \\ = 19892 \approx 20000\,\text{Дж/м}^3.$$

Величины условных поперечных сил: $F_{\text{к}y} = 290800\,\text{Н/м}^3$ и $F_{\text{подк}y} = 6100\,\text{Н/м}^3$. Условная поперечная сила $F_{\text{к}y}$ вычислена ранее [3]. Суммарная условная поперечная сила воздействия консольного ножа на грунт (27): $F_{\Sigma\text{конс}y} = 290800 + 6100 = 296900\,\text{Н/м}^3$.

Приведём суммарную условную поперечную силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$ (28):

$$F_{\text{конс}y} = 296900\frac{0{,}018}{133} \approx 40\text{Н}.$$

Условные горизонтальные продольные силы: $F_{\text{к}x} = 290800\,\text{Н/м}^3$, $F_{\Sigma\text{г}-\text{конс}} = 2690\,\text{Н/м}^3$, $F_{\Sigma\text{г}-\text{конс}} = 6100\,\text{Н/м}^3$. Условная горизонтальная сила $F_{\text{к}y}$ воздействия на грунт кромки лезвия консольного ножа вычислена ранее [3]. Суммарная условная горизонтальная сила воздействия консольного ножа на грунт (29):

$$F_{\Sigma\text{конс}x} = 290800 + 2690 + 6100 = 299590\,\text{Н/м}^3.$$

Приведём суммарную условную горизонтальную силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$ (30):

$$F_{\text{конс}x} = 299590\frac{0{,}018}{133} = 40{,}5\text{Н}.$$

Кроме того, имеется горизонтальная сила $F_{\text{ткрконс}} = 45{,}7\text{Н}$ трения кромки лезвия, горизонтальная составляющая $F_{\text{тфконс}x} = 5{,}7\text{Н}$ силы трения передней фаски, сила $F_{\text{тнпконс}} = 53\text{Н}$ трения нижней поверхности консольного ножа о грунт. Горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения консольного ножа, равна сумме частных горизонтальных сил (31):

$$F_{\Sigma\text{кон}x} = 40{,}5 + 45{,}7 + 5{,}7 + 52 \approx 144\text{Н}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммарная энергия, необходимая для резания грунта консольными ножами около 20 кДж/ куб.м. При этом затраты энергии на взаимодействие кромок лезвий консольных ножей с грунтом около 7 тыс. Дж/куб.м, на взаимодействие фасок лезвий консольных ножей с грунтом около 6 тыс. Дж/куб.м, на преодоление трения грунта о нижнюю плоскость консольного ножа 7 тыс. Дж/куб.м. Для определения общих затрат энергии на резание грунта ковшами агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги нужно проанализировать взаимодействие с грунтом других элементов ковша.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.

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

3. Жук А.Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ротационного плуга // Сборник научных трудов «Теория и расчёт почвообрабатывающих машин». 1989. Т. 120. С. 145–153.

4. Попов Г.Ф. Рабочие органы фрез // Материалы НТС ВИСХОМ. 1970. № 27. С. 490–497.

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

6. 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.

7. Кравец И.М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

гидрофрезой // Строительные и дорожные машины. 2010. №5. С. 47–49.

8. 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.

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

10. 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.

11. 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.

12. Ryabets N., Kurzhner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. Pp. 115–128.

13. 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. Pp. 421–428.

14. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. // Cold Regions Science and Technology. 2013. Vol. 86. Pp. 142–166.

15. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scopic damage development of frozen soil under triaxial shearing. // Rock and Soil Mechanics. 2005. №8. Pp. 150–163.

16. Li Q. Development of Frozen Soil Model. // Advances in Earth Science. 2006. №12. Pp. 96–103.

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

18. 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.

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

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

21. 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.

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

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

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. Николаев В.А. Машины для обработки почвы. Теория и расчёт. Ярославль, ФГБОУ ВПО ЯГСХА, 2014. 358 с.

REFERENCES

1. Nikolayev V.A. Opredelenie skorosti cepej i razmerov plasta grunta, otrezaemogo kovshom agregata dlya udaleniya verhnego sloya grunta s podstilayushchego sloya avtodorogi [Determining the speed of chains and the size of the soil layer cut off 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)

2. Nikolayev V.A. Analiz vzaimodejstviya kromki lezviya konsol'nogo nozha s gruntom [Analysis of the interaction of the edge of the console knife blade with the soil]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2020; 2 : 172–181. (in Russian)

3. Zhuk A.F. Teoreticheskoe obosnovanie racional'noj tekhnologicheskoj skhemy i parametrov rotacionnogo pluga [Theoretical justification of the rational technological scheme and parameters of the rotary plough]. *Sbornik nauchnyh trudov «Teoriya i raschyot pochvoobrabatyvayushchih mashin»*. 1989; 120: 145-153. (in Russian)

4. Popov G.F. Rabochie organy frez [Working bodies of milling cutters]. *Materials VISHOM NTS. ONTI VISHOM.* 1970; 27: 490–497. (in Russian)

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

6. Karnaukhov A.I.. Orlovskiy S.N Opredelenie zatrat udel'noj energii na process rezaniya lesnyh pochv torcevymi frezami [Determination of specific energy costs for the process of cutting forest soils with end mills]. *Construction and road machinery*. 2010; 1: 20–22. (in Russian)

7. Kravets I.M. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezaniya pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezoj [Critical depth of the cut determination in the combined cutting soil by hydromiller]. *Construction and road machinery*. 2010; 5: 47–49. (in Russian)

8. Kirillov F.F. Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

usiliya dlya mnogorezcovyh rabochih organov zemlerojnyh mashin [Deterministic mathematical model of the traction force time distribution for multi-section working bodies of earthmoving machines]. *Construction and road machinery*. 2010; 11: 44-48. (in Russian)

9. Berestov E.I. Vliyanie treniya grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniyu [Soil friction effect on the knife surface on cutting resistance]. *Construction and road machinery*. 2010; 11: 34–38. (in Russian)

10. 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)

11. Balovnev V.I., Nguen Z.SH. Opredelenie soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelyu prochnosti [Determination of resistance in the soil development with a ripper according to the integral strength indicator]. *Construction and road machines.* 2005; 3: 38–40. (in Russian)

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

13. 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.

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

15. 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.

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

17. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. *CRC. Press.* 2007; 448.

18. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.Yu. Issledovanie upravlyaemyh nozhevyh sistem zemlerojno-transportnyh mashin [Research of controlled knife systems of earth moving and transport vehicles]. *Construction and road vehicles.* 2017; 2: 12–15. (in Russian)

19. Nilov V.A., Fyodorov E.V. Razrabotka grunta skreperom v usloviyah svobodnogo rezaniya [Soil development with a scraper in free cutting conditions]. *Construction and road machines*. 2016; 2: 7–10. (in Russian)

20. CHmil' V.P. Nasosno-akkumulyativnyj privod ryhlitelya s avtomaticheskim vyborom ugla rezaniya [Pump-accumulator ripper drive with an automatic choice of a cutting angle]. *Construction and road machines*. 2016; 11: 18–20. (in Russian)

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

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

23. Konstantinov Yu.V. Metodika raschyota soprotivleniya i momenta soprotivleniya rezaniyu pochvy pryamym plastinchatym nozhom frezy [Method for calculating the resistance and a resistance moment to cutting soil with a straight plate cutter knife]. *Tractors and agricultural machines.* 2019; 5: 31–39. (in Russian)

24. 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 bodies of a rotary tillage and ripper separation machine]. *Tractors and agricultural machines.* 2018; 5: 32–39. (in Russian)

25. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoj analiz mekhanizmov peremeshcheniya rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin po zadannoj traektorii [Power analysis of mechanisms for moving working bodies of tillage machines along a given trajectory]. *Tractors and agricultural machines.* 2018; 1: 47–54. (in Russian)

26. Dranyaev S.B., CHatkin M.N., Koryavin S.M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvayushchej frezy [Modeling the operation of a screw l-shaped knife of a tillage mill]. *Tractors and agricultural machines*. 2017; 7: 13–19. (in Russian)

27. Nikolayev V.A. Mashiny dlya obrabotki pochvy. Teoriya i raschyot [Machines for soil processing. Theory and calculation]. Yaroslav, FGBOU VO YAGSKHA. 2014; 358. (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 просп., 88. Телефон: 8 910 961 51 87, e-mail: Nikolaev53@inbox.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A.Nikolaev, Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machines Department, Yaroslavl Technical University. Yaroslavl, Moscow Avenue, 88. Phone: 8 910 961 51 87, e-mail: Nikolaev53@inbox.ru.