

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-452-463>

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРАВОГО НОЖА АГРЕГАТА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С ГРУНТОМ

В.А. Николаев*, Д.И. Трошин
ФГБОУ ВО ЯТУ,
г. Ярославль, Россия
*nikolaev53@inbox.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для решения проблемы ускорения строительства автодорог, повышения их качества целесообразно использовать агрегат непрерывного действия для формирования подстилающего слоя. Основными рабочими органами этого агрегата являются ковши, которые отрезают пласт грунта снизу и сбоку. При этом нижний нож отрезает слой грунта снизу, правый нож – сбоку, а консольный нож частично подрезает верхний слой грунта снизу для следующего ковша. В частности, представляет теоретический и практический интерес анализ взаимодействия с грунтом правого ножа ковша агрегата непрерывного действия. Для этого правый нож разделён на элементы и проведён анализ взаимодействия этих элементов с грунтом. Последовательное воздействие на грунт многих правых ножей в пределах ширины захвата агрегата заменено воздействием на грунт одного условного правого ножа на расстоянии, необходимом для разработки одного кубического метра грунта. Силы взаимодействия условного правого ножа с грунтом названы условными силами.

Методика исследования. Приведена методика расчёта затрат энергии при внедрении правого ножа в грунт: на отделение пласта грунта от его массива, на преодоление трения грунта о кромку лезвия, на преодоление напора грунта на фаску лезвия, на ускорение грунта фаской лезвия, на преодоление трения грунта о фаску, на преодоление трения грунта о наружную поверхность. Общие затраты энергии при взаимодействии правого ножа с грунтом объёмом один кубический метр получены сложением частных затрат энергии. Приведена методика расчёта горизонтальной продольной силы, необходимой для перемещения правого ножа.

Результаты. На основе разработанной методики рассчитаны затраты энергии при внедрении правого ножа в грунт: на отделение пласта грунта от его массива, на преодоление трения грунта о кромку лезвия, на преодоление напора грунта на фаску лезвия, на ускорение грунта фаской лезвия, на преодоление трения грунта о фаску, на преодоление трения грунта о наружную поверхность. Определены общие затраты энергии при взаимодействии правого ножа с грунтом объёмом один кубический метр. Определена горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения правого ножа.

Заключение. В результате выполненных расчётов: энергия, необходимая для резания грунта правыми ножами, свыше 71 Дж/куб. м, горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения правого ножа, – 730 Н. 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, правый нож, затраты энергии, горизонтальная продольная сила.

Поступила 13.08.20, принята к публикации 23.08.2020.

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., Трошин Д.И. Анализ взаимодействия правого ножа агрегата непрерывного действия с грунтом. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (4): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-452-463>

© Николаев В.А., Трошин Д.И.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-452-463>

CONTINUOUS ACTION RIGHT KNIFE UNIT WITH GROUND INTERACTION ANALYSIS

Vladimir A. Nikolayev*, Denis I. Troshin
Yaroslavl Technical University,
Yaroslavl, Russia
*nikolaev53@inbox.ru

ABSTRACT

Introduction. To solve the problem of accelerating the construction of roads, improving their quality, it is advisable to use a continuous action unit to form a underlying layer. The main working bodies of this unit are buckets, which cut off the soil layer from below and on the side. At the same time, the bottom knife cuts off the ground layer from below, the right knife - on the side, and the console knife partially cuts the top layer of soil from below for the next bucket. In particular, the analysis of interaction with the soil of the right knife of the continuous action unit is of theoretical and practical interest. To do this, the right knife is divided into elements and analyzed the interaction of these elements with the ground. The consistent impact on the soil of many right knives, within the width of the grip of the unit, is replaced by the impact on the ground of one conventional right knife at a distance necessary for the development of one cubic meter of soil. The forces of interaction of the conventional right knife with the ground are called conditional forces.

The method of research. The method for calculating the energy costs during punching the right knife into the ground is shown: on separating the formation of the ground from its body, on overcoming the ground friction on the edge of the blade, on overcoming the ground pressure on the edge of the blade, on accelerating the ground of the blade by means of the axle, on overcoming the ground friction on the shelf, to overcome the ground friction against the outside surface. The total energy costs of interacting with a soil of one cubic meter are derived from the addition of private energy costs. The method of calculating the horizontal longitudinal force needed to move the right knife is given.

Results. On the basis of the methodology developed, energy costs are calculated when introducing the right knife into the ground: on separating the soil from its body, on overcoming the friction of the ground on the edge of the blade, on overcoming the pressure of the ground on the face of the blade, on the acceleration of the ground with a fascia blade, on overcoming the ground friction on the face. The total energy costs of the right knife interact with the soil of one cubic meter. The horizontal long-lived force needed to move the right knife has been determined.

Conclusion. As a result of the calculations: the energy needed to cut the ground with the right knives, more than 71 J/cube. The horizontal longitudinal force needed to move the right knife is 730 N. To determine the total energy spent on cutting the ground by buckets of the unit to remove the top layer of soil from the underlying layer of the road, it is necessary to analyze the interaction with the soil of other elements of the bucket.

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

Submitted 13.08.20, revised 23.08.2020.

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: Vladimir A. Nikolayev, Denis I. Troshin. Continuous action right knife unit with ground interaction analysis. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (4): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-452-463>

© Nikolayev V. A., Troshin D. I.



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1) определены затраты энергии: на отделение правым ножом пласта грунта от его массива, на преодоление трения грунта о кромку лезвия правого ножа, на преодоление напора грунта на его фаску, на ускорение грунта фаской, на преодоление трения грунта о фаску, на преодоление трения грунта о наружную поверхность правого ножа;

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

3) определена горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения правого ножа.

ВВЕДЕНИЕ

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 нижний нож отрезает слой грунта снизу, правый нож – сбоку, а консольный нож частично подрезает верхний слой грунта снизу для следующего ковша. Геометрические параметры ковша получены из конструктивной компоновки агрегата [2]. Проанализировано взаимодействие консольного ножа с грунтом. В результате анализа выявлены затраты энергии: на отделение пласта от массива грунта, создание щели в массиве грунта, преодоление трения грунта о кромку лезвия консольного ножа [2], на преодоление напора грунта на фаску консольного ножа, подъём грунта, вертикальное ускорение грунта фаской, преодоление трения грунта о фаску и преодоление трения грунта о нижнюю плоскость консольного ножа [3]. Определены общие затраты энергии при взаимодействии консольного ножа с грунтом в период разработки грунта объёмом один кубический метр, выявлена структура затрат энергии при взаимодействии консольного ножа с грунтом, горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения консольного ножа [3].

Представляет теоретический и практический интерес анализ взаимодействия с грунтом правого ножа ковша агрегата непрерывного действия. Хотя теоретические основы резания грунта весьма подробно рассмотрены [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17,

18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27], но, используя их, сложно оценить частные затраты энергии при работе каждого элемента рабочего органа. Поэтому разделим правый нож на элементы и проведём анализ взаимодействия этих элементов с грунтом. Воспользуемся способом, который состоит в выявлении условных сил и затрат энергии при разработке одного кубического метра грунта. Заменим последовательное воздействие на грунт многих правых ножей в пределах ширины захвата агрегата, воздействием на грунт одного условного правого ножа на расстоянии, необходимом для разработки одного кубического метра грунта. Силы взаимодействия условного правого ножа с грунтом назовём условными силами. Установлено [2], что резание грунта лезвием происходит микроотрывами. Поэтому для определения мгновенных значений сил выявленные условные силы приведём к расстоянию одного микроотрыва.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Чтобы определить условные силы при разработке одного кубического метра грунта, приложенные к правому ножу, следует выявить составляющие затрат энергии на резание. При внедрении правого ножа в грунт существуют затраты энергии:

- на отделение пласта грунта от его массива;
- на преодоление трения грунта о кромку лезвия;
- на преодоление напора грунта на фаску;
- на ускорение грунта фаской;
- на преодоление трения грунта о фаску;
- на преодоление трения грунта о наружную поверхность.

Энергия, необходимая для отделения пласта грунта от его массива лезвием правого ножа

Правый нож [1] осуществляет свободное резание со скольжением, так как пласт грунта подрезан консольным ножом предыдущего ковша. Лезвие правого ножа должно быть максимально наклонено к горизонтали, чтобы резание со скольжением было менее энергетическим. Однако наклон к горизонтали ограничен расстоянием между ковшами $l_{\text{МК}}$. Если угол наклона лезвия правого ножа к горизонтали будет более 45° , то ковши при повороте на поворотных роликах будут задевать друг за друга. Угол заточки лезвия правого ножа $i = 25$, заточка односторонняя, с внутренней фаской. С учётом трансформации угла заточ-

ки лезвия передний угол лезвия правого ножа $\alpha_{\text{пр}} = i_{\text{тр}} = 18,25^\circ$.

Заменим последовательное воздействие на грунт многих правых ножей в пределах ширины захвата агрегата воздействием одного условного ножа на расстоянии, достаточном для разработки одного кубического метра грунта. Из предыдущих расчётов [1, 2, 3] известны: ширина слоя грунта, отрезаемого правым ножом δ , максимальная глубина срезаемого слоя грунта $h_{\text{сл}}$. Для разработки одного кубического метра грунта правый нож должен переместиться на расстояние s_k , время этого перемещения τ_k . Путь, при котором происходит микроотрыв пласта от массива грунта, $l_{\text{отр}}$.

Заменим дискретный отрыв элементов пласта от массива грунта одновременным явлением так, как будто сразу оторван пласт площадью, равной площади отрыва при разработке 1 м³ грунта. Ширина отрыва пласта от массива грунта равна максимальной глубине срезаемого слоя грунта $h_{\text{сл}}$. Площадь отрыва пласта от воздействия лезвия правого ножа при разработке одного кубического метра грунта

$$S_{\text{отрпр}} = h_{\text{сл}} s_k. \quad (1)$$

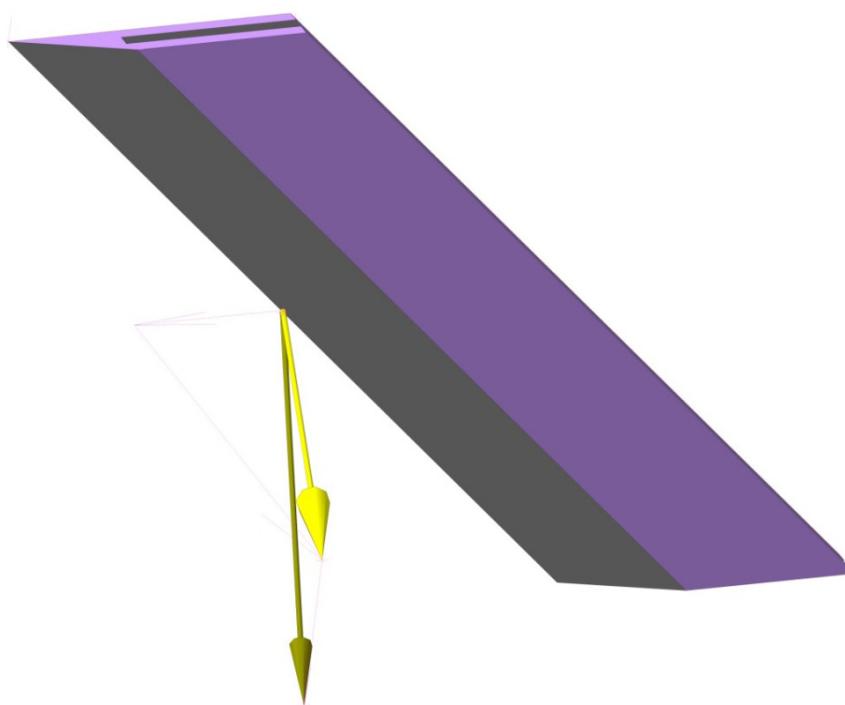


Рисунок 1 – Схема условных сил воздействия на грунт кромки лезвия правого ножа

Figure 1 – Diagram of conditional forces applied to the ground of the right knife edge

При отрыве пласта от массива грунт испытывает деформацию растяжения. Предел прочности грунта на растяжение σ_r^B . Тогда условная сила воздействия передней кромки лезвия правого ножа, необходимая для преодоления сцепления грунта,

$$F_{\text{отрпр}} = \sigma_r^B S_{\text{отрпр}}. \quad (2)$$

Сила $F_{\text{отрпр}}$ является распределённой. Заменим её на сосредоточенную силу, приложенную к середине кромки лезвия правого ножа. Она перпендикулярна плоскости фаски правого ножа. Примем условно величину перемещения при отрыве $h_{\text{отр}}$. Энергия на преодоление сцепления пласта с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр консольным ножом

$$u_{\text{отрпр}} = F_{\text{отрпр}} h_{\text{отр}}. \quad (3)$$

Затраты энергии на преодоление трения грунта о кромку лезвия правого ножа

Нормальная реакция кромки лезвия правого ножа равна суммарной условной силе $F_{\text{отрпр}}$ (вектор травяного цвета) (рисунок 1).

Спроецируем силу $F_{отрпр}$, приложенную к кромке лезвия правого ножа и перпендикулярную плоскости фаски правого ножа, на оси. Определим величины проекций: $F_{пркрx}$, $F_{пркру}$, $F_{пркрz}$. Спроецируем силу $F_{отрпр}$ на горизонтальную плоскость. Определим проекцию $N_{\Sigma крпр}$ нормальной к фаске правого ножа реакции его кромки на воздействие грунта из рисунка 1 (жёлтый вектор). Проекцию нормальной силы $N_{\Sigma крпр}$ приведём к расстоянию микроотрыва $l_{отр}$,

$$N_{крпр} = N_{\Sigma крпр} \frac{l_{отр}}{s_k}. \quad (4)$$

Сила трения

$$F_{ткрпр} = f_{с-г} N_{крпр}. \quad (5)$$

Энергия на преодоление трения грунта о кромку правого ножа

$$u_{ткрпр} = F_{ткрпр} s_k. \quad (6)$$

Затраты энергии на преодоление напора грунта на фаску правого ножа

На основании относительности движения допустим, что не правый нож преодолевает сопротивление грунта, а грунт набегаёт на правый нож со скоростью v_k . Заменим постепенное воздействие грунта на нож одномоментным воздействием всей массы, сосредоточенной в слое при разработке одного кубического метра грунта. Ширина захвата правого ножа равна максимальной глубине срезаемого слоя грунта $h_{сл}$. Толщина правого ножа $b_{пр}$ [1]. Объём грунта, непосредственно воздействующего на фаску правого ножа в секунду,

$$\frac{V_{г-к}}{\tau_{г-к}} = h_{сл} b_{пр} v_k. \quad (7)$$

Плотность грунта ρ . Масса грунта, воздействующего на фаску правого ножа в секунду,

$$m_{г-к} = \rho \frac{V_{г-к}}{\tau_{г-к}}. \quad (8)$$

Допустим, конечная скорость набегающего грунта $v_{кон} = 0$. Мгновенная сила $F_{г-пр}$ набегающего грунта равна силе его инерции

$$F_{г-пр} = am_{г-к} = \rho \frac{V_{г-к}}{\tau_{г-к}} (v_k - v_{кон}). \quad (9)$$

Время перемещения ковша на расстояние

s_k при разработке грунта объёмом один кубический метр τ_k . Условная сила воздействия грунта, набегающего на фаску правого ножа, при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$F_{\Sigma г-пр} = F_{г-пр} \tau_k. \quad (10)$$

Энергия на преодоление напора грунта на фаску правого ножа

$$u_{г-пр} = F_{г-пр} s_k. \quad (11)$$

Затраты энергии на ускорение грунта фаской правого ножа

Допустим, фаска правого ножа придаёт грунту ускорение $a_{гор}$ в горизонтальном направлении, перпендикулярно направлению перемещения ковша. Масса грунта, ускоряемого правым ножом при разработке одного кубического метра грунта, m_y . Условное усилие для создания ускорения грунта правым ножом

$$F_{упр} = m_y a_{гор}. \quad (12)$$

Начальная горизонтальная скорость грунта перпендикулярно направлению перемещения ковша равна нулю: $v_{начгор} = 0$. Скорость ковша v_k . Конечную горизонтальную скорость грунта определим из рисунка 1:

$$v_{конгор} = v_k \tan \alpha_{пр}, \quad (13)$$

где $\alpha_{пр}$ – передний угол лезвия правого ножа, равный углу заточки лезвия с учётом трансформации $\alpha_{пр} = i_{тр}$.

Из пространственной модели (см. рисунок 1) проекция фаски правого ножа на горизонтальную плоскость $45,5 \text{ мм} = 0,0455 \text{ м}$. Время перемещения правого ножа по грунту на это расстояние

$$\tau_{пр} = \frac{0,0455}{v_k}. \quad (14)$$

Горизонтальное ускорение грунта

$$a_{гор} = \frac{v_{конгор} - v_{начгор}}{\tau_{пр}}. \quad (15)$$

Энергия, необходимая для ускорения грунта правым ножом,

$$u_{упр} = \frac{m_y v_{конгор}^2}{2}. \quad (16)$$

Затраты энергии на преодоление трения грунта о фаску правого ножа

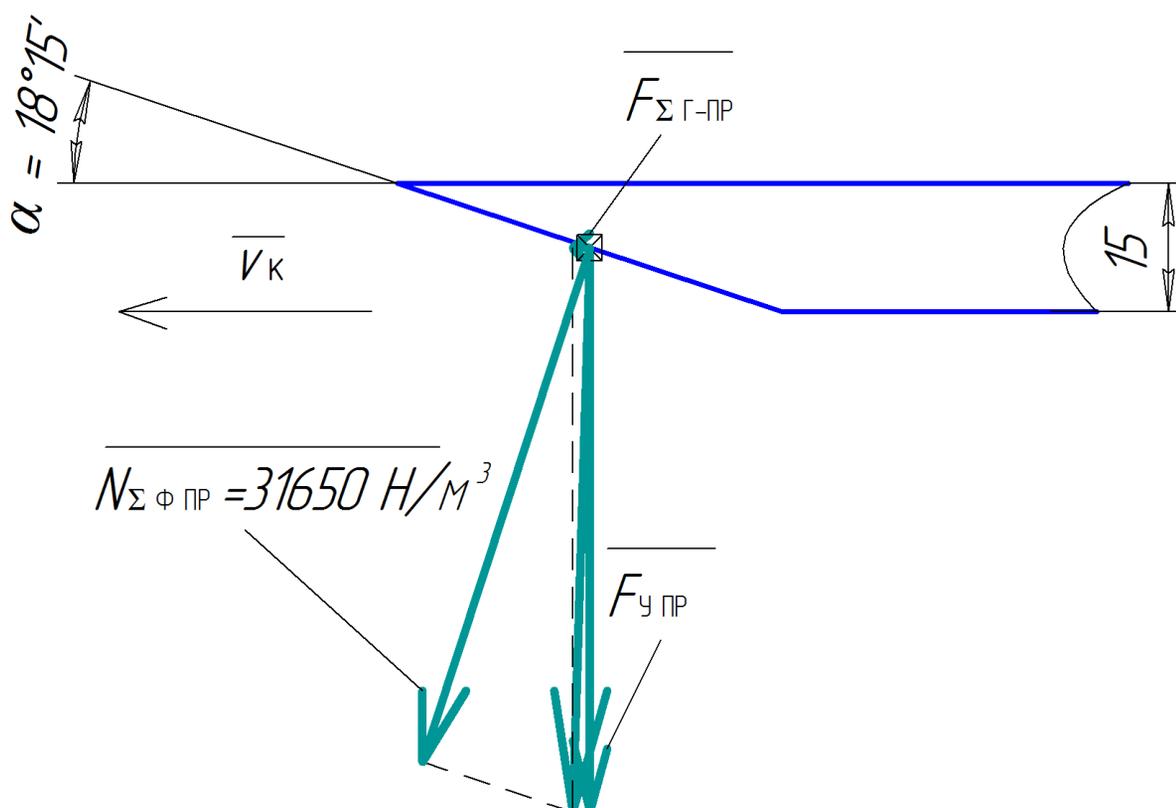


Рисунок 2 – Схема условных сил воздействия фаски правого ножа на грунт в горизонтальной плоскости

Figure 2 – Diagram of the conditional forces of the right knife cutting on the ground horizontally

На рисунке 2 показана схема условных сил воздействия фаски правого ножа на грунт в горизонтальной плоскости при разработке грунта объёмом один кубический метр. Условную силу, равную силе воздействия грунта, набегающего на фаску правого ножа $F_{\Sigma \text{г-пр}}$, направим по ходу ножа. Условное усилие для создания горизонтального ускорения грунта правым ножом $F_{\text{упр}}$ направим перпендикулярно перемещению ковша.

Сложим эти силы и определим равнодействующую. Затем равнодействующую спроецируем на нормаль к фаске и определим из рисунка нормальную реакцию $N_{\Sigma \text{фпр}}$ фаски на воздействие грунта. Приведенная нормальная реакция фаски правого ножа к расстоянию $l_{\text{отр}}$:

$$N_{\text{фпр}} = N_{\Sigma \text{фпр}} \frac{l_{\text{отр}}}{s_{\text{к}}} \quad (17)$$

Сила трения грунта о фаску правого ножа

$$F_{\text{тфпр}} = f_{\text{с-г}} N_{\text{фпр}} \quad (18)$$

Энергия на преодоление трения грунта о фаску правого ножа

$$F_{\text{тфпр}} = f_{\text{с-г}} N_{\text{фпр}} \quad (19)$$

Энергия, необходимая для преодоления трения грунта о наружную поверхность правого ножа, суммарные затраты энергии на перемещение правого ножа

Сила трения грунта о внутреннюю поверхность правого ножа практически равна нулю [2, 3], поэтому вычисляем только силу трения грунта о наружную поверхность правого ножа. Поперечные силы воздействия грунта на правый нож: $F_{\text{пркру}}$, $F_{\text{упр}}$. Их частично уравновешивает суммарная поперечная сила воздействия грунта на консольный нож $F_{\Sigma \text{консу}}$ [2, 3]. Совокупная условная горизонтальная поперечная равнодействующая сила

$$F_{\Sigma \text{пру}} = F_{\text{пркру}} + F_{\text{упр}} - F_{\Sigma \text{консу}} \quad (20)$$

Приведём поперечную равнодействующую силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$:

$$F_{\text{пру}} = F_{\Sigma\text{пру}} \frac{l_{\text{отр}}}{s_{\text{к}}} \quad (21)$$

Кроме того, силу $F_{\text{тфпр}}$ трения грунта о фаску правого ножа следует разложить на продольную и поперечную составляющие:

$$F_{\text{тфпрх}} = F_{\text{тфпр}} \cos 18,25^\circ; \quad (22)$$

$$F_{\text{тфпру}} = F_{\text{тфпр}} \sin 18,25^\circ. \quad (23)$$

Нормальная реакция наружной поверхности правого ножа

$$N_{\text{нппр}} = F_{\text{пру}} + F_{\text{тфпру}}. \quad (24)$$

Сила трения грунта о наружную поверхность правого ножа

$$F_{\text{тнппр}} = f_{\text{с-г}} N_{\text{нппр}}. \quad (25)$$

Энергия на преодоление трения грунта о наружную поверхность правого ножа

$$u_{\text{тнппр}} = F_{\text{тнппр}} s_{\text{к}}. \quad (26)$$

Суммарная энергия, необходимая для резания грунта правыми ножами,

$$u_{\text{пр}} = u_{\text{отрпр}} + u_{\text{ткрпр}} + u_{\text{г-пр}} + u_{\text{упр}} + u_{\text{тфпр}} + u_{\text{тнппр}}. \quad (27)$$

Суммарная условная вертикальная сила равна вертикальной силе воздействия грунта на кромку правого ножа: $F_{\Sigma\text{прз}} = F_{\text{пркрз}}$.

Приведём эту суммарную силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$:

$$F_{\text{прз}} = F_{\Sigma\text{прз}} \frac{l_{\text{отр}}}{s_{\text{к}}}. \quad (28)$$

Величины вертикальных сил воздействия грунта на элементы ковша потребуются в дальнейших исследованиях при рассмотрении его равновесия при работе. Сложим условные горизонтальные продольные силы $F_{\text{пркрх}}$ и $F_{\Sigma\text{г-пр}}$:

$$F_{\Sigma\text{прх}} = F_{\text{пркрх}} + F_{\Sigma\text{г-пр}}. \quad (29)$$

Приведём продольную равнодействующую силу к расстоянию микроотрыва $l_{\text{отр}}$:

$$F_{\text{прх}} = F_{\Sigma\text{прх}} \frac{l_{\text{отр}}}{s_{\text{к}}}. \quad (30)$$

Кроме того, имеются другие продольные составляющие: сила $F_{\text{ткрпр}}$ трения кромки лезвия, горизонтальная составляющая $F_{\text{тфпрх}}$ силы трения фаски, сила $F_{\text{тнппр}}$ трения наружной поверхности правого ножа о грунт. Горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения правого ножа, равна сумме всех продольных сил

$$F_{\Sigma\text{прх}} = F_{\text{прх}} + F_{\text{ткрпр}} + F_{\text{тфпрх}} + F_{\text{тнппр}}. \quad (31)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Известные результаты предыдущих расчётов [1]: ширина слоя грунта, отрезаемого правым ножом $\delta = 30$ мм, максимальная глубина срезаемого слоя грунта $h_{\text{сд}} = 0,25$ м, скорость ковша $v_{\text{к}} = 1,686$ м/с. Для разработки одного кубического метра грунта консольный нож должен переместиться на расстояние [2] $s_{\text{к}} = 133$ м/м³. Время перемещения ковша на расстояние $s_{\text{к}} \tau_{\text{к}} = 78,885$ с/м³. Допустим, плотность грунта $\rho = 1600$ кг/м³.

Отделение пласта от массива грунта происходит микроотрывами, $l_{\text{отр}} = 0,018$ м. Ширина отрыва пласта от массива грунта равна максимальной глубине срезаемого слоя грунта $h_{\text{сд}} = 0,25$ м. Площадь отрыва пласта от воздействия лезвия правого ножа при разработке одного кубического метра грунта (1):

$$S_{\text{отрпр}} = 0,25 \cdot 133 = 33,25 \text{ м}^2/\text{м}^3 = 33250000 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

При отрыве пласта от массива грунт испытывает деформацию растяжения. Учитывая армированность поверхностного слоя корнями растений, примем для зажатого резания со скольжением предел прочности грунта на растяжение $\sigma_{\text{р}}^{\text{в}} = 0,12$ МПа. Общая сила воздействия передней кромки лезвия одного ножа, необходимая для преодоления сцепления грунта (2),

$$F_{\text{отрпр}} = 0,12 \cdot 33250000 = 3990000 \text{ Н}/\text{м}^3.$$

Примем условно величину перемещения при отрыве $h_{\text{отр}} = 1$ мм. Энергия на преодоление сцепления пласта с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр консольным ножом (3):

$$u_{\text{отрпр}} = 3990000 \cdot 0,001 = 3990 \text{ Дж}/\text{м}^3.$$

Спроецировав силу $F_{отрпр}$, приложенную к кромке правого лезвия и перпендикулярную плоскости фаски правого ножа (см. рисунок 1), на оси, определим величины проекций:

$$F_{пркрх} = 1787100 \text{ Н/м}^3, F_{пркрз} = 3616200 \text{ Н/м}^3,$$

$$F_{пркрз} = 1206600 \text{ Н/м}^3; F_{пркрх} = 0,448F_{отрпр};$$

$$F_{пркрз} = 906F_{отрпр}; F_{пркрх} = 0,302F_{отрпр}.$$

Проекция нормальной к фаске правого ножа реакции его кромки на воздействие грунта из рисунка 1 (жёлтый вектор) $N_{скрпр} = 3807800 \text{ Н/м}^3$. Проекцию нормальной силы $N_{скрпр}$ приведём к расстоянию микроотрыва $l_{отр}$ (4),

$$N_{крпр} = 3807800 \frac{0,018}{133} = 516 \text{ Н}.$$

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

$$F_{ткрпр} = 0,5 \cdot 516 = 258 \text{ Н}.$$

Энергия на преодоление трения грунта о кромку правого ножа (6):

$$u_{ткрпр} = 258 \cdot 133 = 34314 \text{ Дж/м}^3.$$

Ширина захвата правого ножа равна максимальной глубине срезаемого слоя грунта $h_{сл} = 0,25 \text{ м}$. Толщина правого ножа $b_{пр} = 15 \text{ мм} = 0,015 \text{ м}$. Объём грунта, непосредственно воздействующего на фаску правого ножа в секунду (7),

$$\frac{V_{г-к}}{\tau_{г-к}} = 0,25 \cdot 0,015 \cdot 1,686 \approx 0,0063 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Плотность грунта $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$. Масса грунта, воздействующего на фаску правого ножа в секунду (8),

$$m_{г-к} = 1600 \cdot 0,0063 \approx 10,1 \text{ кг/с}.$$

Допустим, конечная скорость набегающего грунта $v_{кон} = 0$. Мгновенная сила $F_{г-пр}$ набегающего грунта равна силе его инерции (9):

$$F_{г-пр} = 10,1 \cdot 1,686 \approx 17 \text{ Н/с}.$$

Время перемещения ковша на расстояние s_k при разработке грунта объёмом один кубический метр $\tau_k = 78,885 \text{ с/м}^3$. Условная сила

воздействия грунта, набегающего на фаску правого ножа, при разработке грунта объёмом один кубический метр (10):

$$F_{\Sigma г-пр} = 17 \cdot 78,885 \approx 1345 \text{ Н/м}^3.$$

Энергия на преодоление напора грунта на фаску правого ножа (11):

$$u_{г-пр} = 17 \cdot 133 = 2261 \text{ Дж/м}^3.$$

Фаска правого ножа придаёт грунту ускорение $a_{гор}$ в горизонтальном направлении, перпендикулярно направлению перемещения ковша. Масса грунта, ускоряемого правым ножом при разработке одного кубического метра грунта, $m_y = 1600 \text{ кг}$. Начальная горизонтальная скорость грунта перпендикулярна направлению перемещения ковша $v_{начгор} = 0$. Скорость ковша $v_k = 1,686 \text{ м/с}$. Конечная горизонтальная скорость грунта (13):

$$v_{конгор} = 1,686 \cdot \tan 18,25^\circ = 0,556 \text{ м/с}.$$

Из пространственной модели проекция фаски правого ножа на горизонтальную плоскость $45,5 \text{ мм} = 0,0455 \text{ м}$. Время перемещения правого ножа по грунту на это расстояние (14):

$$\tau_{пр} = \frac{0,0455}{1,686} = 0,027 \text{ с}.$$

Горизонтальное ускорение грунта (15):

$$a_{гор} = \frac{0,556 - 0}{0,027} = 20,6 \text{ м/с}^2.$$

Условное усилие для создания ускорения грунта правым ножом (12):

$$F_{упр} = 1600 \cdot 20,6 = 32960 \text{ Н/м}^3.$$

Энергия, необходимая для ускорения грунта правым ножом, (16):

$$u_{упр} = \frac{1600 \cdot 0,556^2}{2} \approx 247 \text{ Дж/м}^3.$$

Из рисунка 2 условная нормальная реакция фаски правого ножа $N_{\Sigma фпр} = 31650 \text{ Н/м}^3$. Приведенная нормальная реакция фаски правого ножа к расстоянию $l_{отр} = 0,018 \text{ м}$ (17):

$$N_{фпр} = 31650 \frac{0,018}{133} = 4,2 \text{ Н}.$$

Сила трения грунта о фаску правого ножа (18):

$$F_{\text{тфпр}} = 0,5 \cdot 4,2 = 2,1 \text{Н.}$$

Энергия на преодоление трения грунта о фаску правого ножа (19):

$$u_{\text{тфпр}} = 2,1 \cdot 133 = 279 \text{ Дж/м}^3.$$

Поперечные силы воздействия грунта на правый нож: $F_{\text{пркпу}} = 3616200 \text{ Н/м}^3$, $F_{\text{упр}} = 32960 \text{ Н/м}^3$.

Условная поперечная сила воздействия грунта на консольный нож $F_{\text{Σконсу}} = 296900 \text{ Н/м}^3$. Совокупная условная горизонтальная поперечная равнодействующая сила (20):

$$F_{\text{Σпру}} = 3616200 + 32960 - 296900 = 3352360 \text{ Н/м}^3.$$

Приведенная поперечная равнодействующая сила к расстоянию $l_{\text{отр}}$ (21):

$$F_{\text{пру}} = 3352360 \frac{0,018}{133} = 454 \text{Н.}$$

Продольная и поперечная составляющие силы $F_{\text{тфпр}}$ трения грунта о фаску правого ножа (22, 23):

$$F_{\text{тфпрх}} = 2,1 \cdot 0,95 = 2 \text{Н. } F_{\text{тфпру}} = 2,1 \cdot 0,313 = 0,7 \text{Н.}$$

Нормальная реакция наружной поверхности правого ножа (24):

$$N_{\text{нппр}} = 453,7 + 0,7 = 454,4 \text{Н.}$$

Сила трения грунта о наружную поверхность правого ножа (25):

$$F_{\text{тнппр}} = 0,5 \cdot 454,4 \approx 227 \text{Н.}$$

Энергия на преодоление трения грунта о наружную поверхность правого ножа (26):

$$u_{\text{тнппр}} = 227 \cdot 133 = 30191 \text{ Дж/м}^3.$$

Суммарная энергия, необходимая для резания грунта правыми ножами, (27):

$$u_{\text{пр}} = 3990 + 34314 + 2261 + 247 + 279 + 30191 = 71282 \text{ Дж/м}^3.$$

Суммарная условная вертикальная сила равна условной вертикальной силе воздействия грунта на кромку правого ножа: $F_{\text{Σпрз}} = F_{\text{пркпз}} = 1206600 \text{ Н/м}^3$.

Приведенная вертикальная сила к расстоянию $l_{\text{отр}}$ (28):

$$F_{\text{прз}} = 1206600 \frac{0,018}{133} = 163 \text{Н.}$$

Условные горизонтальные продольные силы: $F_{\text{пркпрх}} = 1787100 \text{ Н/м}^3$ и $F_{\text{Σг-пр}} = 1345 \text{ Н/м}^3$.

Их сумма (29):

$$F_{\text{Σпрх}} = 1787100 + 1345 = 1788445 \text{ Н/м}^3.$$

Приведенная продольная равнодействующая сила к расстоянию $l_{\text{отр}}$ (30):

$$F_{\text{прх}} = 1788445 \frac{0,018}{133} = 242 \text{Н.}$$

Величины других продольных составляющих: сила $F_{\text{ткрпр}} = 258 \text{Н}$ трения кромки лезвия, горизонтальная составляющая $F_{\text{тфпрх}} = 2 \text{Н}$ силы трения фаски, сила $F_{\text{тнппр}} = 227 \text{Н}$ трения наружной поверхности правого ножа о грунт. Горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения правого ножа, (31):

$$F_{\text{Σпрх}} = 242 + 258 + 2 + 227 = 729 \text{Н} \approx 730 \text{Н.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если суммарная энергия, необходимая для резания грунта консольными ножами, около 20 кДж/куб.м [3], то суммарная энергия, необходимая для резания грунта правыми ножами, выше. Соответственно, горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения консольного ножа, 144 Н [3], а правого ножа – 730 Н. С целью 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. Николаев В.А. Анализ взаимодействия поверхности консольного ножа с грунтом // Вестник СибАДИ. 2020. №3. С. 340-350.
4. Жук А.Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ро-

тационного плуга // Теория и расчёт почвообрабатывающих машин. 1989. Т. 120. С. 145-153.

5. Попов Г.Ф. Рабочие органы фрез // Материалы НТС ВИСХОМ. 1970. Вып. 27. С. 490-497.

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

7. 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.

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

9. 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.

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

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

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

16. 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.

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

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

19. 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.

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

21. Чмиль В.П. Насосно-аккумулятивный привод рыхлителя с автоматическим выбором угла реза-

ния // Строительные и дорожные машины. 2016. №11. С. 18-20.

22. 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.

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

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

25. 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.

26. 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.

27. 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.

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. Nikolaev V.A. Analiz vzaimodejstvija kromki lezviya konsol'nogo nozha s gruntom [Analysis of the interaction of the surface of the console knife with the ground]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. 340-350. (in Russian)

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

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

6. Karasyev G.N. Opredelenie sily rezaniya grunta s uchotom 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)

7. Karnaukhov A.I., Orlovskiy S.N. Opredelenie zatrat udel'noj energii na process rezaniya lesnykh pochv torcevmi 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)

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

9. Kirillov F.F. Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo usiliya dlya mnogorezcovykh rabochnih organov zemlerojnykh mashin [Deterministic mathematical model of the traction force time distribution for multi-section working bodies of earth moving machines]. *Construction and road machinery*. 2010; 11: 44-48. (in Russian)

10. 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)

11. Vershinin A.V., Subov V.S., Tyulnev A.M. Povyshenie effektivnosti diskofreznykh rabochnih mekhanizmov dlya razrabotki myorzlykh 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)

12. 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)

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

14. 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.

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

16. 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.

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

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

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

20. 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)

21. 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)

22. Kabashev R.A., Turgumbaev S.D. Eksperimental'nye issledovaniya processa kopaniya gruntov rotorno-diskovymi rabochnimi 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. (in Russian)

23. Syomkin D.S. O vliyaniy skorosti rabocheho 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)

24. 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)

25. Syromyatnikov Yu.N., Hramov I.S., Vojnash S.A. Gibkij element v sostave rabochnih 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)

26. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoj analiz mekhanizmov peremeshcheniya rabochnih 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)

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГОУ ВО Ярославский технический университет (г. Ярославль, Московский просп., 88, тел. 8 910 961 51 87, e-mail: Nikolaev53@inbox.ru).

Трошин Денис Игоревич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГОУ ВО Ярославский технический университет (г. Ярославль, Московский просп., 88, тел. 8 930 119 13 25).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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.

Denis I. Troshin, Dr. of Sci., Assistant Professor of the Construction and Road Machines Department, Yaroslavl Technical University. Yaroslavl, Moscow Avenue, 88. Phone: 8 930 119 13 25.