

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-598-610>

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГРУНТОМ НИЖНЕГО НОЖА КОВША АГРЕГАТА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕГО СЛОЯ АВТОДОРОГИ

В.А. Николаев
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 нижнего ножа ковша агрегата непрерывного действия. Для этого нижний нож разделён на элементы и проведён анализ взаимодействия этих элементов с грунтом. Последовательное воздействие на грунт многих нижних ножей, в пределах ширины захвата агрегата, заменено воздействием на грунт одного условного нижнего ножа на расстоянии, необходимом для разработки одного кубического метра грунта. Силы взаимодействия условного нижнего ножа с грунтом названы условными силами.

Методика исследования. Приведена методика расчёта затрат энергии при внедрении нижнего ножа в грунт. В общем случае при внедрении нижнего ножа в грунт существуют затраты энергии на отделение пласта грунта, на преодоление трения грунта о кромку лезвия, на преодоление напора грунта на фаску, на подъём грунта, на вертикальное ускорение грунта фаской, на преодоление трения грунта о фаску, на преодоление трения грунта о поверхность, на преодоление трения грунта о нижнюю плоскость. Общие затраты энергии при взаимодействии нижнего ножа с грунтом объёмом один кубический метр получены сложением частных затрат энергии. Приведена методика расчёта горизонтальной продольной силы, необходимой для перемещения нижнего ножа.

Результаты. На основе разработанной методики рассчитаны затраты энергии при внедрении нижнего ножа на отделение пласта грунта, на преодоление трения грунта о кромку лезвия, на преодоление напора грунта на фаску, на подъём грунта, на вертикальное ускорение грунта фаской, на преодоление трения грунта о фаску, на преодоление трения грунта о нижнюю плоскость. Затраты энергии на преодоление трения грунта о поверхность нижнего ножа равны нулю, так как грунт перелетает через неё. Определены общие затраты энергии при взаимодействии нижнего ножа с грунтом объёмом один кубический метр. Определена горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения нижнего ножа.

Заключение. В результате выполненных расчётов энергия, необходимая для резания грунта нижними ножами, около 5 кДж/куб. м, горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения нижнего ножа, – 16 Н. Для определения общих затрат энергии на перемещение ковшей 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, нижний нож, затраты энергии, горизонтальная продольная сила.

Поступила 28.09.20, принята к публикации 23.10.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Николаев В.А. Анализ взаимодействия с грунтом нижнего ножа ковша агрегата для формирования подстилающего слоя автодороги. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-598-610>

© Николаев В.А.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-598-610>

INTERACTION ANALYSIS OF BUCKET BOTTOM KNIFE WITH SOIL TO BUILD UP SUBBASE

Vladimir A. Nikolaev

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 elements of this unit are buckets, which cut off the soil layer from below and 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 ground of the bottom knife of the continuous action unit is of theoretical and practical interest. To do this, the lower knife is divided into elements and the interaction of these elements with the soil is analyzed. The consistent impact on the soil of many bottom knives, within the width of the grip of the unit, is replaced by the impact on the ground of one conventional bottom knife at a distance necessary for the development of one cubic meter of soil. The forces of interaction of the conventional bottom knife with the soil are called conditional forces.

The method of research. The method of calculating energy costs when introducing the bottom knife into the ground is presented. In general, when introducing the bottom knife in the ground, there are energy costs: to separate the soil, to overcome the friction of the ground on the edge of the blade, to overcome the pressure of the ground on the face, to the rise of the ground, to the vertical acceleration of the ground by the phase, to overcome the friction of the ground on the face, to overcome the friction of the ground on the surface, to overcome the friction of the ground on the lower plane. The total energy costs of interacting with a one cubic metre soil are derived from the addition of private energy costs. The method of calculating the horizontal longitudinal force needed to move the bottom knife is given.

Results. On the basis of the developed method, energy costs are calculated in the introduction of the lower knife: on the separation of the soil, on overcoming the friction of the ground on the edge of the blade, on overcoming the pressure of the ground on the face, on the rise of the ground, on the vertical acceleration of the ground face, on overcoming the friction of the ground on the fascia, to overcome the friction of the ground on the lower plane. Energy costs to overcome the friction of the ground on the surface of the bottom knife are zero, as the soil flies over it. The total energy costs of the bottom knife interact with the soil of one cubic meter. The horizontal long-lived force needed to move the bottom knife has been determined.

Conclusion. As a result of the calculations: the energy needed to cut the ground with the bottom knives, about 5 kJ/cube m., horizontal longitudinal force needed to move the lower knife - 16 N. To determine the total energy costs of moving the boiler unit to remove the top layer of soil from the underlying layer of the road, you need to analyze the interaction with the soil of other elements of the bucket.

KEYWORDS: Road, continuous action unit, ground, bottom knife, energy costs, horizontal longitudinal force.

Submitted 28.09.20, revised 23.10.2020.

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. Interaction analysis of bucket bottom knife with soil to build up subbase. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-598-610>

© Nikolaev V.A.



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1) определены затраты энергии на отделение нижним ножом пласта грунта, на преодоление трения грунта о кромку лезвия нижнего ножа, на преодоление напора грунта на его фаску, на подъём грунта, на ускорение грунта фаской, на преодоление трения грунта о фаску, на преодоление трения грунта о нижнюю плоскость нижнего ножа;

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

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

ВВЕДЕНИЕ

Агрегат непрерывного действия для формирования подстилающего слоя [1, 2, 3] предназначен для увеличения производительности труда при строительстве автомобильных дорог и других объектов, для строительства которых необходимо снятие верхнего слоя грунта. 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 [1]. Проанализировано взаимодействие консольного ножа и правого ножа с грунтом [2, 3].

Чтобы определить общие затраты энергии на перемещение кошей агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги, нужно выполнить анализ взаимодействия с грунтом нижнего ножа ковша. 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 нижний 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. Заменяем последовательное воздействие на грунт многих нижних ножей, в пределах ширины захвата агрегата, воздействи-

ем на грунт одного условного нижнего ножа на расстоянии, необходимом для разработки одного кубического метра грунта. Силы взаимодействия условного нижнего 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 расчёта параметров резания грунта горизонтальным лезвием зависит от того, влияет напор срезанного ранее грунта на процесс резания или не влияет. Так, например, на подрезаемый снизу грунт ножом бульдозера или лемехом плуга воздействует подрезанный ранее грунт, который перемещается по поверхности отвала бульдозера или плуга. Игнорирование воздействия подрезанного ранее грунта на процесс его резания такими техническими средствами приведёт к искажению результатов расчёта.

Грунт, подрезанный нижним ножом ковша агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги, постепенно заполняет ковш. При заполнении ковша подрезанный разрыхлённый грунт не оказывает существенного воздействия на процесс резания. Лишь в конце заполнения ковша напор срезанного ранее грунта, заполняющего ковш, начинает влиять на процесс резания. Однако этим влиянием можно пренебречь, поскольку ёмкость ковша выбрана такой, что грунт в ковше при его заполнении располагался свободно, без существенного уплотнения.

Лезвие «Н» нижнего ножа (рисунок 1) направлено под углом 10° к планке крепления ковша, то есть под углом 80° к направлению его перемещения. Нижний нож имеет правый выступ *ПВ*, левый выступ *ЛВ* и задний выступ *ЗВ*, посредством которых его фиксируют в корпусе ковша. Приваренный к нижнему ножу прижим служит для его установки в корпусе ковша, а также фиксирования консольного ножа.

Правая сторона нижнего ножа осуществляет свободное резание, так как слой почвы справа отрезан ранее правым ножом. Резание происходит с незначительным скольжением, поскольку лезвие «Н» расположено под углом 80° к направлению перемещения ковша. Угол заточки лезвия нижнего ножа $i = 19^\circ$, заточка односторонняя, с верхней фаской. С учётом трансформации угол заострения лезвия нижнего ножа $\alpha_{пр} = i_{тр} = 18,25^\circ$.

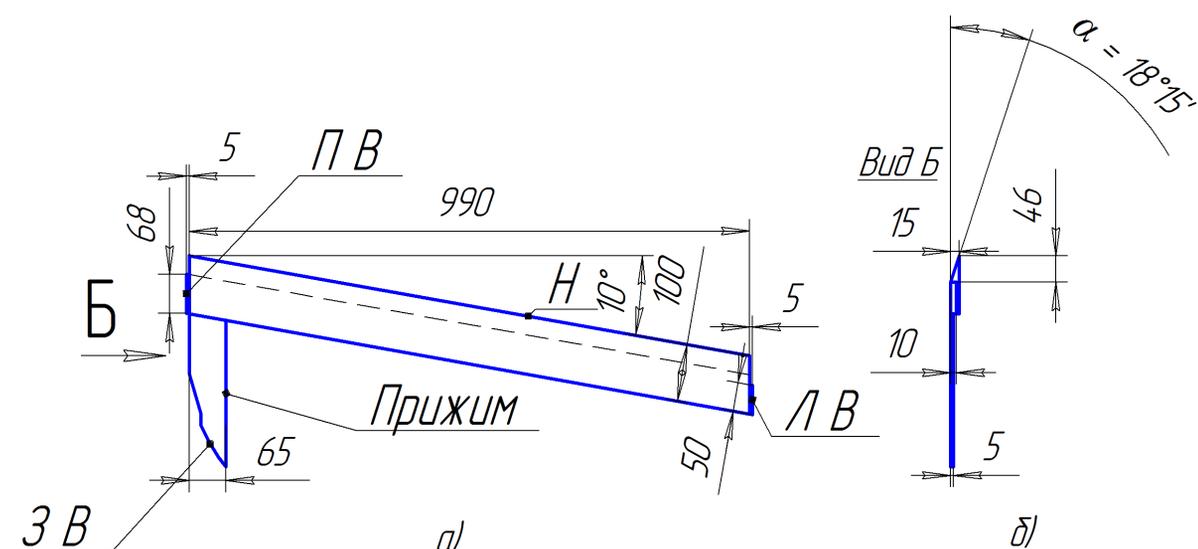


Рисунок 1 – Нижний нож с прижимом: а– вид снизу; б – вид Б

Figure 1 – Bottom knife with a press: (a) view from below; b) View B

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Правая сторона нижнего лезвия «Н» подрезает снизу пласт грунта, который уже подрезан консольным ножом предыдущего ковша. Остальная часть нижнего лезвия зачищает поверхность подстилающего слоя автодороги. Величины сил и затраты энергии на зачистку поверхности подстилающего слоя автодороги зависят от многих трудноучитываемых факторов, поэтому их вычислить сложно. Примем все нагрузки на левую сторону нижнего лезвия равным нагрузкам на правую сторону. Поэтому величины сил и затраты энергии, вычисленные для правой стороны нижнего лезвия, умножим на два.

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

- на отделение пласта грунта;
- на преодоление трения грунта о кромку лезвия;
- на преодоление напора грунта на фаску;
- на подъем грунта;
- на вертикальное ускорение грунта фаской;
- на преодоление трения грунта о фаску;
- на преодоление трения грунта о поверхность;
- на преодоление трения грунта о нижнюю плоскость.

Энергия, необходимая для отделения пласта грунта нижним ножом

Заменим дискретный отрыв элементов пласта от массива грунта единовременным явлением так, как будто сразу оторван пласт площадью, равной площади отрыва при разработке 1 м³ грунта. Предел прочности грунта на растяжение σ_p^B . Ширина отрыва пласта правой стороной нижнего лезвия b_H [2]. Общая длина отрыва пласта от массива грунта объемом один кубический метр равна s_K . Площадь отрыва пласта от воздействия лезвия консольного ножа $S_{отрн} = b_H s_K$. Общая сила воздействия правой стороны передней кромки лезвия одного условного нижнего ножа, необходимая для преодоления сцепления грунта,

$$F_{отрпсн} = \sigma_p^B S_{отрн}. \quad (1)$$

Примем величину перемещения грунта при отрыве $h_{отр} = 1$ мм. Энергия на преодоление сцепления пласта с грунтом при разработке грунта объемом один кубический метр нижним условным ножом

$$u_{отрн} = F_{отрпсн} h_{отр}. \quad (2)$$

Затраты энергии на преодоление трения грунта о кромку лезвия нижнего ножа

Построим пространственную модель нижнего ножа (рисунок 2).

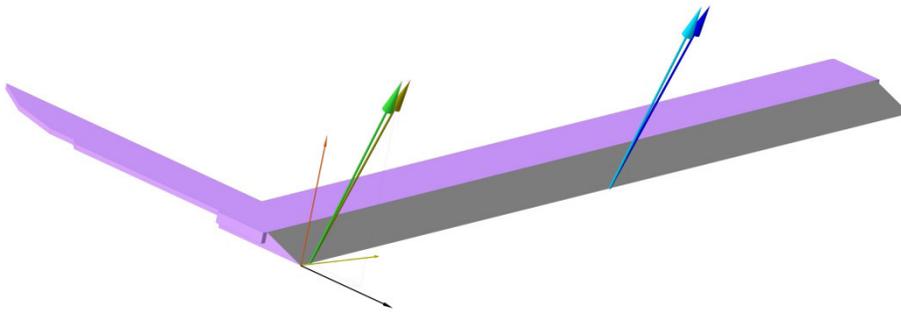


Рисунок 2 – Схема суммарных сил воздействия кромки нижнего ножа на грунт

Figure 2 – Scheme of total forces of impact of the edge of the bottom knife on the ground

Полученную силу воздействия правой стороны кромки лезвия условного нижнего ножа приложим к нижнему ножу справа на расстоянии $\frac{b_n}{2}$. Силу воздействия остальной кромки лезвия условного нижнего ножа приложим посередине остальной части кромки лезвия. Обе силы направим перпендикулярно плоскости фаски нижнего ножа. Спроецируем обе силы на оси x (чёрная), y (жёлтая), z (оранжевая), определим величины проекций $F_{прnx}$, $F_{прny}$, $F_{прnz}$ и их соотношение к силе воздействия правой стороны кромки лезвия условного нижнего ножа. При этом условная сила отрыва пласта кромкой лезвия правой стороны нижнего ножа и левой стороны нижнего ножа $F_{отрпсн} = F_{отрлсн} = F_{отрн}$.

Спроецируем силу воздействия правой стороны кромки лезвия условного нижнего ножа $F_{отрпсн}$ и силу воздействия левой стороны кромки лезвия условного нижнего ножа $F_{отрлсн}$ (вектор травяного цвета, синий вектор) на продольную вертикальную плоскость. Проекция нормальной реакции кромки нижнего ножа на воздействие грунта из рисунка 2, соответственно, правой и левой её стороны (зелёный вектор, голубой вектор) $N_{\Sigma крпсн}$, $N_{\Sigma крлсн}$. Обе проекции нормальных сил приведём к расстоянию микроотрыва $l_{отр}$:

$$N_{крпсн} = N_{\Sigma крпсн} \frac{l_{отр}}{s_k}. \quad (3)$$

Примем коэффициент трения между сталью и грунтом $f_{с-г}$. Сила трения правой стороны нижнего ножа

$$F_{ткрпсн} = f_{с-г} N_{крпсн}. \quad (4)$$

Сила трения левой стороны нижнего ножа $F_{ткрлсн} = F_{ткрпсн}$. Энергия на преодоление трения грунта о кромку нижнего ножа

$$u_{ткрн} = 2F_{ткрпсн} s_k. \quad (5)$$

Затраты энергии на преодоление напора грунта на фаску нижнего ножа

На основании относительности движения допустим, что не нижний нож преодолевает сопротивление грунта, а грунт набегаёт на нижний нож со скоростью v_k . Заменим постепенное воздействие грунта на нож одномоментным воздействием всей массы, сосредоточенной в слое при разработке одного кубического метра грунта. Максимальный срезаемый слой грунта $h_{сл}$. Толщина нижнего ножа h_n . При таких параметрах срезаемого слоя [2] известен объём грунта, непосредственно воздействующего на фаску нижнего ножа в секунду, $\frac{V_{г-к}}{\tau_{г-к}}$, масса грунта, воздействующего на фаску нижнего ножа в секунду, $m_{г-к}$ и мгновенная сила $F_{г-н}$ набегающего грунта $F_{г-н}$. Время перемещения ковша на расстояние s_k при разработке грунта объёмом один кубический метр τ_k . Отсюда суммарная сила воздействия грунта, набегающего на фаску нижнего ножа, при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$F_{\Sigma г-н} = F_{г-н} \tau_k. \quad (6)$$

Энергия на преодоление напора грунта на фаску нижнего ножа

$$u_{г-н} = F_{\Sigma г-н} v_k. \quad (7)$$

Затраты энергии на подъём грунта нижним ножом

Так как пласт грунта отделён от его массива консольным ножом, то энергия, необходимая для подъёма грунта, является потенциальной энергией подъёма груза на высоту, равную толщине нижнего ножа h_n . Допустим, плотность грунта ρ . Масса грунта, поднимаемого нижним ножом,

$$m_{\text{под}} = \rho V_{\text{под}}. \quad (8)$$

Условная сила подъёма грунта нижним ножом

$$F_{\text{подн}} = m_{\text{под}} g. \quad (9)$$

Энергия, необходимая для подъёма грунта нижним ножом,

$$u_{\text{подн}} = m_{\text{под}} g h_n. \quad (10)$$

Придадим направление условной силе $F_{\text{подн}}$ перпендикулярно плоскости верхней фаски нижнего ножа. Из рисунка 2 были вычислены проекции силы $F_{\text{отрпсн}}$. По аналогии определим проекции на оси x , y , z условной силы $F_{\text{подн}}$.

Затраты энергии на вертикальное ускорение грунта фаской нижнего ножа

Фаска нижнего ножа не только поднимает грунт, расположенный над нижним ножом, но и придаёт ему вертикальное ускорение. Масса грунта, ускоряемого нижним ножом при разработке одного кубического метра грунта, $m_y = m_{\text{под}}$. Условная сила для создания вертикального ускорения грунта нижним ножом

$$F_{\text{ун}} = m_y a_{\text{верт}}. \quad (11)$$

Начальная вертикальная скорость грунта равна нулю: $v_{\text{начверт}} = 0$. Скорость ковша v_k направлена горизонтально. Угол заострения лезвия нижнего ножа $\alpha_{\text{пр}} = i_{\text{тр}} = 18,25^\circ$. Конечная вертикальная скорость грунта

$$v_{\text{конверт}} = v_k \tan \alpha_{\text{пр}}. \quad (12)$$

Горизонтальная проекция фаски нижнего ножа $46\text{мм} = 0,046\text{м}$ (рисунок 3). Время перемещения консольного ножа по грунту на это расстояние

$$\tau_{\phi} = \frac{0,046}{v_k}. \quad (13)$$

Вертикальное ускорение грунта

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

Условную силу для создания вертикального ускорения грунта нижним ножом определим по формуле (11).

Энергия, необходимая для вертикального ускорения грунта нижним ножом,

$$u_{\text{ун}} = \frac{m_y v_{\text{конверт}}^2}{2}. \quad (15)$$

Затраты энергии на преодоление трения грунта о фаску нижнего ножа

На рисунке 3 условную силу, равную силе воздействия грунта, набегающего на фаску нижнего ножа $F_{\Sigma\Gamma-n}$, направим по ходу ножа. Нанесём горизонтальную и вертикальную проекции условной силы $F_{\text{подн}}$ на продольно-вертикальную плоскость $F_{\text{поднх}}$ и $F_{\text{поднз}}$. Условную силу для создания вертикального ускорения грунта нижним ножом $F_{\text{ун}}$ направим вертикально. Сложим эти силы и определим равнодействующую. Затем равнодействующую спроецируем на нормаль к фаске и определим нормальную реакцию фаски на воздействие грунта. Из рисунка совокупная нормальная реакция фаски нижнего ножа $N_{\Sigma\text{фн}}$. Приведенная нормальная реакция фаски нижнего ножа к расстоянию $l_{\text{отр}}$

$$N_{\text{фн}} = N_{\Sigma\text{фн}} \frac{l_{\text{отр}}}{s_k}. \quad (16)$$

Сила трения грунта о фаску нижнего ножа

$$F_{\text{тфн}} = f_{c-\Gamma} N_{\text{фн}}. \quad (17)$$

Энергия на преодоление трения грунта о фаску нижнего ножа

$$u_{\text{тфн}} = F_{\text{тфн}} s_k. \quad (18)$$

Затраты энергии на преодоление трения грунта о поверхность нижнего ножа

Слой грунта от воздействия фаски нижнего ножа приобретает вертикальное ускорение $a_{\text{верт}} = 20,36 \text{ м/с}^2$. Определим параметры полёта пласта грунта. Представим частицу грунта материальной точкой, пущенной с фаски нижнего ножа под углом α к горизонту. Из уравнения

$$g\tau_d^2 - 2v_{\text{конверт}}\tau_d = 0 \rightarrow g\tau_d - 2v_{\text{конверт}} = 0$$

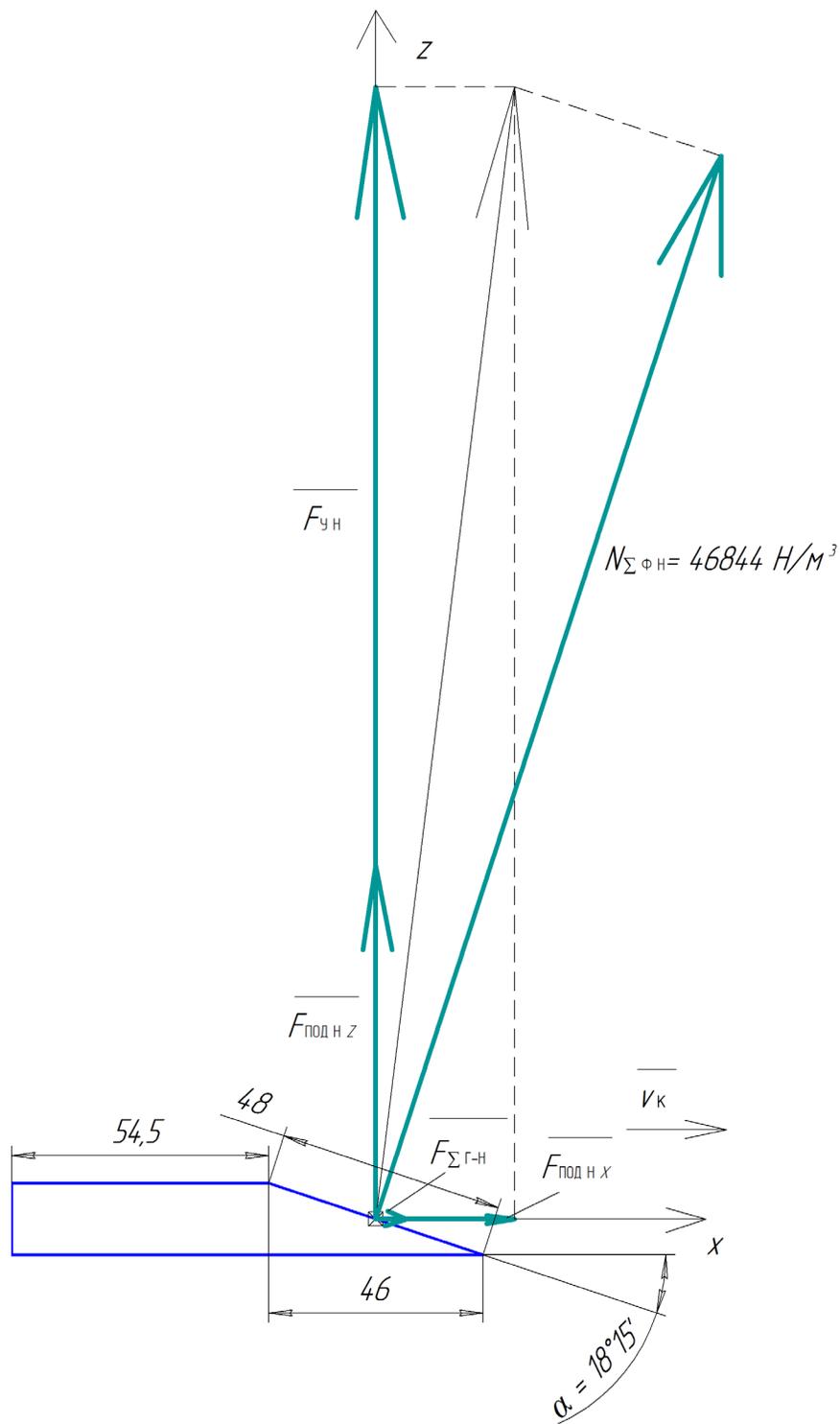


Рисунок 3 – Схема условных сил воздействия фаски нижнего ножа на грунт

Figure 3 – Conventional force scheme of exposure to the face of the bottom knife on the ground

определим время полёта частицы грунта, в течение которого она опустилась бы до уровня поверхности нижнего ножа:

$$\tau_d = \frac{2v_{\text{конверт}}}{g}; \tau_d = \frac{2 \cdot 0,556}{9,8} = 0,113 \text{ с.}$$

За это время нижний нож преодолет расстояние

$$s_d = v_k \tau_d; s_d = 1,686 \cdot 0,113 \approx 0,19 \text{ м} = 190 \text{ мм.}$$

Из рисунка 3 длина поверхности нижнего ножа равна 54,5 мм. Поэтому грунт перелетит через нижний нож. Затраты энергии на преодоление трения грунта о поверхность нижнего ножа равны нулю.

Энергия, необходимая для преодоления трения грунта о нижнюю плоскость нижнего ножа, суммарные затраты энергии на перемещение нижнего ножа

Сложив все вертикальные силы: $F_{\text{прнз}}$, $F_{\text{поднз}}$, $F_{\text{ун}}$, определим совокупную вертикальную равнодействующую силу $F_{\Sigma \text{нз}}$. Приведём вертикальную равнодействующую силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$:

$$F_{\text{нз}} = F_{\Sigma \text{нз}} \frac{l_{\text{отр}}}{s_k}. \quad (19)$$

Кроме того, силу $F_{\text{тфн}}$ трения грунта о фаску нижнего ножа следует разложить на горизонтальную и вертикальную составляющие:

$$F_{\text{тфнх}} = F_{\text{тфн}} \cos 18,25^\circ; \quad (20)$$

$$F_{\text{тфнз}} = F_{\text{тфн}} \sin 18,25^\circ. \quad (21)$$

Нормальная реакция нижней плоскости нижнего ножа

$$N_{\text{нпн}} = F_{\text{нз}} + F_{\text{тфнз}}. \quad (22)$$

Сила трения нижней плоскости нижнего ножа о грунт

$$F_{\text{тнпн}} = f_{\text{с-г}} N_{\text{нпн}}. \quad (23)$$

Энергия на преодоление трения нижней плоскости нижнего ножа о грунт

$$u_{\text{тнпн}} = F_{\text{тнпн}} s_k. \quad (24)$$

Суммарная энергия, необходимая для резания грунта нижним ножом:

$$u_n = u_{\text{отрн}} + u_{\text{ткрн}} + u_{\text{г-н}} + u_{\text{подн}} + u_{\text{ун}} + u_{\text{тфн}} + u_{\text{тнпн}}. \quad (25)$$

Сложив условные поперечные силы $F_{\text{прну}}$ и $F_{\text{подну}}$, определим суммарную условную поперечную силу $F_{\Sigma \text{ну}}$. Приведём условную поперечную силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$:

$$F_{\text{ну}} = F_{\Sigma \text{ну}} \frac{l_{\text{отр}}}{s_k}. \quad (26)$$

Сложив все условные горизонтальные продольные силы $F_{\text{прнх}}$, $F_{\Sigma \text{г-н}}$, $F_{\text{поднх}}$, определим суммарную условную горизонтальную продольную силу $F_{\Sigma \text{нх}}$. Приведём суммарную условную горизонтальную силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$:

$$F_{\text{нх}} = F_{\Sigma \text{нх}} \frac{l_{\text{отр}}}{s_k}. \quad (27)$$

Кроме того, имеются горизонтальные силы: сила $F_{\text{ткрпсн}}$ трения правой стороны кромки лезвия нижнего ножа, сила $F_{\text{ткрлсн}}$ трения левой стороны кромки лезвия нижнего ножа, горизонтальная составляющая $F_{\text{тфнх}}$ силы трения фаски, сила $F_{\text{тнпн}}$ трения нижней плоскости нижнего ножа о грунт. Горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения нижнего ножа,

$$F_{\Sigma \text{нх}} = F_{\text{нх}} + 2F_{\text{ткрпсн}} + F_{\text{тфнх}} + F_{\text{тнпн}}; \quad (28)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Известные результаты предыдущих расчётов [1]: ширина слоя грунта, отрезаемого правым ножом $\delta = 30 \text{ мм}$, максимальная глубина срезаемого слоя грунта $h_{\text{сл}} = 0,25 \text{ м}$, скорость ковша $v_k = 1,686 \text{ м/с}$. Для разработки одного кубического метра грунта консольный нож должен переместиться на расстояние [2] $s_k = 133 \text{ м}^3$. Время перемещения ковша на расстояние s_k $\tau_k = 78,885 \text{ с/м}^3$. Допустим, плотность грунта $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$.

Ширина отрыва пласта правой стороной нижнего лезвия $b_n = \delta = 30 \text{ мм}$ [2]. Общая длина отрыва пласта от массива грунта объёмом один кубический метр равна s_k . Площадь отрыва пласта от воздействия лезвия консольного ножа $S_{\text{отрн}} \approx 4000000 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Правая сторона нижнего лезвия «Н» подрезает снизу пласт грунта, который уже подрезан консольным ножом предыдущего ковша, поэтому прием предел прочности грунта на растяжение $\sigma_p^B = 0,01 \text{ МПа}$. Сила воздействия правой стороны кромки лезвия условного нижнего ножа,

необходимая для преодоления сцепления грунта, (1):

$$F_{\text{отрпсн}} = 0,01 \cdot 4000000 = 40000 \text{ Н/м}^3; F_{\text{отрлсн}} = F_{\text{отрпсн}}$$

Примем величину перемещения грунта при отрыве $h_{\text{отр}} = 1 \text{ мм}$. Энергия на преодоление сцепления пласта с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр нижним условным ножом (2):

$$u_{\text{отрн}} = 2 \cdot 40000 \cdot 0,001 = 80 \text{ Дж/м}^3.$$

Построим пространственную модель нижнего ножа (см. рисунок 2). Полученную силу воздействия правой стороны кромки лезвия условного нижнего ножа приложим к нижнему ножу справа на расстоянии $\frac{b_n}{2}$ от правого края лезвия. Силу воздействия левой стороны кромки лезвия условного нижнего ножа приложим посередине остальной части передней кромки лезвия. Обе силы направим перпендикулярно плоскости фаски нижнего ножа. Спроецируем обе силы на оси. Величины проекций из рисунка 2:

$$F_{\text{прнх}} = 12458 \text{ Н/м}^3, F_{\text{прну}} = 2218 \text{ Н/м}^3, F_{\text{прнз}} = 37956 \text{ Н/м}^3; \\ F_{\text{прнх}} = 0,31F_{\text{отрпсн}}; F_{\text{прну}} = 0,055F_{\text{отрпсн}}; F_{\text{прнз}} = 0,949F_{\text{отрпсн}}$$

Проекция нормальной реакции кромки нижнего ножа на воздействие грунта на продольно-вертикальную плоскость из рисунка 2 (зелёный вектор, голубой вектор) $N_{\Sigma\text{крпсн}} = 39942 \text{ Н/м}^3$ и $N_{\Sigma\text{крлсн}} = 39942 \text{ Н/м}^3$.

Проекцию нормальной реакции $N_{\Sigma\text{крпсн}}$ приведём к расстоянию микроотрыва $l_{\text{отр}}$ (3):

$$N_{\text{крпсн}} = 39942 \frac{0,018}{133} = 5,4 \text{ Н.}$$

Примем коэффициент трения между сталью и грунтом $f_{\text{с-г}} = 0,5$. Сила трения правой стороны кромки лезвия нижнего ножа (4):

$$F_{\text{ткрпсн}} = 0,5 \cdot 5,4 = 2,7 \text{ Н.}$$

Сила трения левой стороны кромки лезвия нижнего ножа $F_{\text{ткрлсн}} = F_{\text{ткрпсн}} = 2,7 \text{ Н}$. Энергия на преодоление трения грунта о кромку нижнего ножа (5):

$$u_{\text{ткрн}} = 2 \cdot 2,7 \cdot 133 = 718 \text{ Дж/м}^3.$$

Максимальный срезаемый слой грунта $h_{\text{сл}} = 0,25 \text{ м}$. Толщина нижнего ножа $h_n = 15 \text{ мм} = 0,015 \text{ м}$. При таких параметрах срезаемого слоя [2] объём грунта, непосред-

ственно воздействующего на фаску нижнего ножа в секунду, $\frac{V_{\text{г-к}}}{\tau_{\text{г-к}}} \approx 0,0063 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$. Масса грунта, воздействующего на фаску нижнего ножа в секунду, $m_{\text{г-к}} \approx 10,1 \text{ кг/с}$. Мгновенная сила $F_{\text{г-н}}$ набегающего грунта $F_{\text{г-н}} \approx 17 \text{ Н/с}$. 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 нижнего ножа, при разработке грунта объёмом один кубический метр (6):

$$F_{\Sigma\text{г-н}} = 17 \cdot 78,885 \approx 1341 \text{ Н/м}^3.$$

Энергия на преодоление напора грунта на фаску нижнего ножа (7):

$$u_{\text{г-н}} = 1341 \cdot 1,686 = 2261 \text{ Дж/м}^3.$$

Высота подъёма грунта равна толщине нижнего ножа $h_n = 0,015 \text{ м}$.

Допустим, плотность грунта $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$. Масса грунта, поднимаемого нижним ножом, (8):

$$m_{\text{под}} = 1600 \cdot 1 = 1600 \text{ кг.}$$

Условная сила подъёма грунта нижним ножом (9):

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

Энергия, необходимая для подъёма грунта нижним ножом, (10):

$$u_{\text{подн}} = 1600 \cdot 9,8 \cdot 0,015 \approx 235 \text{ Дж/м}^3.$$

Из рисунка 2 были вычислены проекции силы $F_{\text{отрпсн}}$: $F_{\text{прнх}} = 0,31F_{\text{отрпсн}}$; $F_{\text{прну}} = 0,055F_{\text{отрпсн}}$; $F_{\text{прнз}} = 0,949F_{\text{отрпсн}}$. По аналогии проекции на оси суммарной силы $F_{\text{подн}}$:

$$F_{\text{поднх}} = 0,31 \cdot 15680 = 4860 \text{ Н/м}^3;$$

$$F_{\text{подну}} = 0,055 \cdot 15680 = 862 \text{ Н/м}^3;$$

$$F_{\text{поднз}} = 0,949 \cdot 15680 = 14880 \text{ Н/м}^3.$$

Масса грунта, ускоряемого нижним ножом при разработке одного кубического метра грунта, $m_y = m_{\text{под}} = 1600 \text{ кг}$. Начальная вертикальная скорость грунта равна нулю: $v_{\text{начверт}} = 0$. Скорость ковша $v_k = 1,686 \text{ м/с}$. Конечная вертикальная скорость грунта (12):

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

Время перемещения нижнего ножа по грунту на расстояние $0,046 \text{ м}$ (13):

$$\tau_{\phi} = \frac{0,046}{1,686} = 0,00273 \text{ с.}$$

Вертикальное ускорение грунта (14):

$$a_{\text{верт}} = \frac{0,556-0}{0,00273} = 20,36 \text{ м/с}^2.$$

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

$$F_{\text{ун}} = 1600 \cdot 20,36 = 32586 \text{ Н/м}^3.$$

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

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

На рисунке 3 условную силу, равную силе воздействия грунта, набегающего на фаску нижнего ножа $F_{\Sigma\Gamma-\text{н}} = 1345 \text{ Н/м}^3$, направим по ходу ножа. Нанесём горизонтальную и вертикальную проекции условной силы $F_{\text{подн}}$ на продольно-вертикальную плоскость $F_{\text{поднх}} = 4860 \text{ Н/м}^3$; $F_{\text{поднз}} = 14880 \text{ Н/м}^3$. Условную силу для создания вертикального ускорения грунта нижним ножом $F_{\text{ун}} = 32586 \text{ Н/м}^3$ направим вертикально. Из рисунка совокупная нормальная реакция фаски нижнего ножа $N_{\Sigma\text{фн}} = 46844 \text{ Н/м}^3$. Приведенная нормальная реакция фаски нижнего ножа к расстоянию $l_{\text{отр}}$ (16):

$$N_{\text{фн}} = 46844 \frac{0,018}{133} \approx 6 \text{ Н.}$$

Сила трения грунта о фаску нижнего ножа (17):

$$F_{\text{тфн}} = 0,5 \cdot 6 = 3 \text{ Н.}$$

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

$$u_{\text{тфн}} = 3 \cdot 133 \approx 400 \text{ Дж/м}^3.$$

Сложим все вертикальные силы: $F_{\text{прнз}} = 37956 \text{ Н/м}^3$, $F_{\text{поднз}} = 14880 \text{ Н/м}^3$, $F_{\text{ун}} = 32586 \text{ Н/м}^3$. Совокупная вертикальная равнодействующая сила

$$F_{\Sigma\text{нз}} = 37956 + 14880 + 32586 = 85422 \text{ Н/м}^3.$$

Приведём вертикальную равнодействующую силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$ (19):

$$F_{\text{нз}} = 85422 \frac{0,018}{133} = 11,5 \text{ Н.}$$

Кроме того, силу $F_{\text{тфн}}$ трения грунта о фаску нижнего ножа разложим на горизонтальную и вертикальную составляющие (20, 21):

$$F_{\text{тфнх}} = 3 \cdot 0,949 = 2,8 \text{ Н.}$$

$$F_{\text{тфнз}} = 3 \cdot 0,313 = 0,94 \text{ Н.}$$

Нормальная реакция нижней плоскости нижнего ножа (22):

$$N_{\text{нпн}} = 11,5 + 0,94 \approx 12,4 \text{ Н.}$$

Сила трения нижней плоскости нижнего ножа о грунт (23):

$$F_{\text{тнпн}} = 0,5 \cdot 12,4 \approx 6 \text{ Н.}$$

Энергия на преодоление трения нижней плоскости нижнего ножа о грунт (24):

$$u_{\text{тнпн}} = 6 \cdot 133 = 798 \text{ Дж/м}^3.$$

Суммарная энергия, необходимая для резания грунта нижним ножом, (25):

$$u_{\text{н}} = 80 + 718 + 2261 + 235 + 247 + 400 + 798 = 4739 \approx 4740 \text{ Дж/м}^3.$$

Сложим поперечные силы: $F_{\text{прну}} = 2218 \text{ Н/м}^3$ и $F_{\text{подну}} = 862 \text{ Н/м}^3$. Суммарная условная поперечная сила

$$F_{\Sigma\text{ну}} = 2218 + 862 = 3080 \text{ Н/м}^3.$$

Приведём суммарную условную поперечную силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$ (26):

$$F_{\text{ну}} = 3080 \frac{0,018}{133} = 0,4 \text{ Н.}$$

Поперечной силой, приложенной к нижнему лезвию можно пренебречь.

Сложим все горизонтальные продольные силы: $F_{\text{прнх}} = 12458 \text{ Н/м}^3$, $F_{\Sigma\Gamma-\text{н}} \approx 1345 \text{ Н/м}^3$, $F_{\text{поднх}} = 4860 \text{ Н/м}^3$. Суммарная условная горизонтальная продольная сила

$$F_{\Sigma\text{нх}} = 12458 + 1345 + 4860 = 18663 \text{ Н/м}^3.$$

Приведём горизонтальную равнодействующую силу к расстоянию $l_{\text{отр}}$ (27):

$$F_{\text{нх}} = 18663 \frac{0,018}{133} = 2,5 \text{ Н.}$$

Кроме того, имеются горизонтальные силы: сила $F_{\text{ткрпсн}} = 2,7 \text{ Н}$ трения правой стороны кромки лезвия нижнего ножа, сила

$F_{\text{Ткрлсн}} = 2,7\text{Н}$ трения левой стороны кромки лезвия нижнего ножа, горизонтальная составляющая $F_{\text{Тфнх}} = 2,8\text{Н}$ силы трения фаски, сила $F_{\text{Тнпн}} = 6\text{Н}$ трения нижней плоскости нижнего ножа о грунт. Горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения нижнего ножа, (28):

$$F_{\Sigma\text{нх}} = 2,5 + 2 \cdot 2,7 + 2,8 + 6 \approx 16\text{Н}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если суммарная энергия, обязательная для резания грунта консольными ножами около 20 кДж/м^3 , суммарная энергия для резания грунта правыми ножами свыше 71 кДж/м^3 , то суммарная энергия, необходимая для резания грунта нижними ножами, менее 5 кДж/м^3 . Соответственно, горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения консольного ножа, 144 Н [3], правого ножа – 730 Н , нижнего ножа 16 Н . Для определения общих затрат энергии на перемещение ковшей 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 правого ножа агрегата непрерывного действия с грунтом // Вестник СибАДИ. 2020. №4. С. 452-463.
4. Жук А.Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ротационного 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 многорезцовых 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-scope 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 резания // 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 ро-

торной 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 podstilaushchego 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 vzaimodejstviya pravogo nozha agregata nepreryvnogo dejstviya s gruntom [Analysis of the interaction of the right knife of the continuous action unit with the ground]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 1: 32-43.

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 uchyotom uprugih deformatsij 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 lesnyh pochv torcevyimi 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 gidrofreznoj [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 rabochih organov zemlerojnyh 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 povernosti 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 rabochih 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., Kurzchner 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 nozhevyyh 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)

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 avtomaticheskimi 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 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. (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 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)

26. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoj analiz mekhanizmov peremeshcheniya rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin po zadanoj traektorii [Power analysis of mechanisms for mov-

ing 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 l-shaped knife of a tillage mill]. *Tractors and agricultural machines*. 2017; 7: 13-19. (in Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГОУ ВО «Ярославский технический университет» (г. Ярославль, Московский пр., 88, тел. 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.