

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-172-181>

## АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРОМКИ ЛЕЗВИЯ КОНСОЛЬНОГО НОЖА С ГРУНТОМ

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Чтобы автомобильная дорога была долговечной при минимально необходимых затратах на её строительство, следует тщательно удалить верхний слой грунта, не затрагивая грунт, расположенный под верхним слоем. Проблема удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя. Основными рабочими органами агрегата являются ковши. Лезвие консольного ножа, установленного на ковше, подрезает верхний слой грунта снизу. Оно расположено под углом  $45^\circ$  к направлению перемещения ковша, имеет угол заточки. Передний угол лезвия консольного ножа.

**Методика исследования.** Консольный нож разделен на элементы: кромку лезвия, верхнюю фаску лезвия, поверхность консольного ножа, нижнюю плоскость. 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 кромки лезвия консольного ножа в грунт: на отделение пласта от массива грунта, на создание щели в массиве грунта, на преодоление трения грунта о кромку лезвия консольного ножа. Общие затраты энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр получены сложением частных затрат энергии.

**Результаты.** На основе разработанной методики расчёта выявлено расстояние, на которое должен переместиться консольный нож для разработки одного кубического метра грунта, и время этого перемещения. Рассчитаны затраты энергии при внедрении кромки лезвия консольного ножа в грунт: на отделение пласта от массива грунта, на создание щели в массиве грунта, на преодоление трения грунта о кромку лезвия консольного ножа. Определены общие затраты энергии и их структура при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр.

**Заключение.** Общие затраты энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр около 7 тыс. Дж/куб.м. В структуре затрат энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом преобладают затраты энергии на преодоление трения грунта о кромку лезвия. Для определения общих затрат энергии на резание грунта консольными ножами ковшей агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги нужно проанализировать взаимодействие с грунтом других элементов консольных ножей.

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

Поступила 12.03.2020, принята к публикации 24.04.2020.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Николаев В.А. Анализ взаимодействия кромки лезвия консольного ножа с грунтом. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (2): 172-181. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-172-181>

© Николаев В.А.

Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-172-181>

## ANALYSIS OF INTERACTION OF A CANTILEVER KNIFE BLADE WITH SOIL

Vladimir A. Nikolaev

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
“Yaroslavl State Technical University”,  
Yaroslavl, Russia

### ABSTRACT

**Introduction.** In order to the road to be durable at the minimum necessary cost for its construction, the topsoil should be carefully removed without disturbing the soil located under the topsoil. The problem of cheapening the roads construction without reducing their quality can be solved by creating a continuous unit for the formation of the underlying layer. The main working elements of the unit are shovels. The blade of the cantilever knife fixed on the shovel cuts the topsoil from the bottom. It is located at the angle of  $45^\circ$  to the direction of movement of the shovel and also has a sharpening angle. The front angle of the blade of the cantilever knife.

**The method of research.** The cantilever knife is divided into the elements: the edge of the blade, the upper face of the blade, the surface of the cantilever knife, a lower plane. The consecutive impact of many cantilever knives on the ground within the operating unit width with the ground of one notional cantilever knife at a distance necessary for the excavation of one cubic meter of soil was replaced. The interacting forces of a notional cantilever knife with soil are called notional forces. The methodology of calculating energy costs when penetrating the edge of the blade of the cantilever knife into the soil is presented: to separate a layer from the body of the soil, to create a gap in the body of the soil, to overcome the friction of the soil against the edge of a blade of a cantilever knife. The total energy consumption during the interaction of a edge of a blade of a cantilever knife in the soil excavation with a volume of one cubic meter was obtained by adding the particular energy consumption.

**Results.** Based on the developed calculation method, the distance at which a cantilever knife has to move to excavate one cubic meter of soil, and the time of this movement determined. The energy costs are calculated when penetrating the edge of the blade of the cantilever knife into the soil: to separate a layer from the body of soil, to create a gap in the body of soil, to overcome the friction of the soil against the edge of a blade of a cantilever knife. The total energy consumption and their structure during the interaction of the edge of a blade of a cantilever knife with the soil during the soil excavation with a volume of one cubic meter are determined.

**Conclusion.** The total energy consumption during the interaction of an edge of a blade of a cantilever knife with the soil during the development of soil with a volume of one cubic meter is about 7 thousand J/cubic meter. In the energy costs structure during the interaction of an edge of a blade of a cantilever knife with the soil, energy costs prevail to overcome the friction of the soil against an edge of a blade. To determine the total energy consumption for cutting soil with cantilever knives shovels of the unit for removing the upper soil layer from the underlying layer of a road, it is necessary to analyze the interaction of other elements of cantilever knives with the soil.

**KEYWORDS:** road, continuous action unit, soil, cantilever knife, energy costs.

Submitted 13.02.20120, revised 24.04.2020.

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: Nikolayev V.A. Analysis of interaction of a cantilever knife blade with soil. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (2): 172-181. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-172-181>

© Nikolaev V.A.



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

**Основные положения:**

- 1) определены затраты энергии: на отделение пласта от массива грунта, создание щели в массиве грунта, преодоление трения грунта о кромку лезвия консольного ножа;
- 2) определены общие затраты энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом в период разработки грунта объёмом один кубический метр;
- 3) выявлена структура затрат энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом.

**ВВЕДЕНИЕ**

Чтобы автомобильная дорога была долговечной при минимально необходимых затратах на её строительство, следует тщательно удалить верхний слой грунта, не затрагивая грунт, расположенный под верхним слоем. Проблема удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя<sup>1</sup> [1]. Основными рабочими органами 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. Геометрические параметры ковша получены из конструктивной компоновки агрегата [1].

Консольный нож (рисунок 1) является лег-

косъёмным. Полку консольного ножа вставляют внутрь корпуса ковша и фиксируют прижимом нижнего ножа [1]. Консольный нож осуществляет зажатое резание, так как слой почвы над ним весьма значительный. Чтобы резание грунта происходило с малыми затратами энергии, передний угол лезвия консольного ножа в продольно-вертикальной плоскости, соответствующей направлению движения агрегата, должен быть меньше угла трения стали о грунт:  $\varphi_{с-г} \approx 26^\circ$ . Примем передний угол лезвия консольного ножа  $\alpha = 25^\circ < \varphi_{с-г}$ . Так как лезвие расположено под углом  $45^\circ$  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. Это называют трансформацией угла заострения. В связи с трансформацией угла заострения для повышения прочности лезвия консольного ножа угол заточки лезвия увеличим до  $i = 31,8^\circ$ .

Теоретические основы резания грунта весьма подробно рассмотрены<sup>2,3</sup> [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24], однако представляет теоретический и практический интерес анализ резания грунта консольным ножом ковша агрегата непрерывного действия.

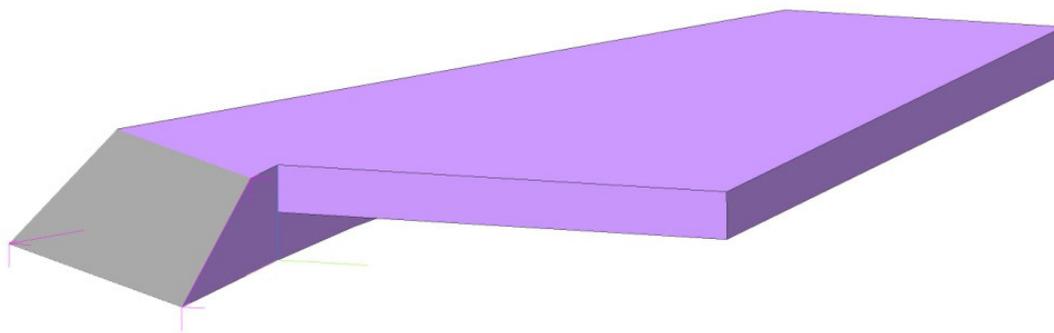


Рисунок 1 – Консольный нож

Figure 1 – Cantilever knife

<sup>1</sup> Патент №2689007 РФ. Агрегат для удаления почвы с подстилающего слоя автодороги / В.А. Николаев, И.С. Тюремов. №2018122727; заявл. 21.06.2018; опубл. 23.05.2019, бюл №15. 11 с.

<sup>2</sup> Жук А.Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ротационного плуга // Сборник научных трудов «Теория и расчёт почвообрабатывающих машин». Т 120. М.: «Машиностроение», 1989. С. 145–153.

<sup>3</sup> Попов Г.Ф. Рабочие органы фрез. М.: Материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. ОНТИ ВИСХОМ, 1970. С. 490–497.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Разделим консольный нож на элементы: кромку лезвия, верхнюю фаску лезвия, поверхность консольного ножа, нижнюю плоскость и проведём анализ взаимодействия этих элементов с грунтом. Существуют два способа определения затрат энергии на перемещение рабочего органа в грунте [24]. Первый способ заключается в определении среднего значения результирующей силы сопротивления грунта перемещению рабочего органа с последующим умножением на его путь в грунте или другом обрабатываемом материале. Для выявления среднего значения результирующей силы сопротивления грунта определяют средние значения сил взаимодействия каждого элемента с грунтом. Этот способ удобен там, где есть возможность с достаточной степенью точности определить массу грунта, воздействующую на элемент рабочего органа. Однако не всегда удаётся определить с достаточной степенью точности массу грунта, воздействующую на элемент рабочего органа, а также и некоторые действующие силы.

Сущность второго способа состоит в выявлении условных сил и затрат энергии при разработке одного кубического метра грунта. При определении условных сил взаимодействия элементов рабочего органа с грунтом широко используют моделирование в пространстве и плоскости. Установлено [24], что резание грунта лезвием происходит микроотрывами. Поэтому для определения мгновенных значений сил выявленные условные силы приводят к расстоянию одного микроотрыва. Для определения затрат энергии при взаимодействии с грунтом кромки лезвия консольного ножа целесообразно использовать второй способ. Заменяем 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.

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

- на отделение пласта от массива грунта;
- на создание щели в массиве грунта;

- на деформацию части массива грунта;
- на преодоление трения грунта о кромку лезвия консольного ножа.

Энергия, необходимая для отделения пласта грунта от его массива кромкой лезвия консольного ножа

Кромка лезвия консольного ножа, врезаясь в грунт, отделяет пласт грунта от его массива. Ширина захвата лезвия консольного ножа  $b_k$ , максимальная глубина срезаемого слоя грунта  $h_{сл}$  и скорость цепей  $v_{ц}$  известны [1]. Для разработки одного кубического метра грунта консольный нож должен переместиться на расстояние

$$s_k = \frac{1}{b_k h_{сл}}. \quad (1)$$

Так как скорость ковша равна скорости цепей  $v_k = v_{ц}$ , то время перемещения ковша на расстояние  $s_k$ :

$$\tau_k = \frac{s_k}{v_k}. \quad (2)$$

Заменяем дискретный отрыв элементов пласта от массива грунта единовременным явлением так, как будто сразу оторван пласт площадью, равной площади отрыва при разработке 1 грунта. Ширина отрыва пласта от массива грунта равна ширине захвата консольного ножа  $b_k$ . Общая длина отрыва пласта от массива грунта объёмом один кубический метр равна  $s_k$ . Площадь отрыва пласта от воздействия лезвия консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$S_{отркнс} = b_k s_k. \quad (3)$$

При отрыве пласта от массива грунт испытывает деформацию растяжения. Примем для зажатого резания со скольжением предел прочности грунта на растяжение  $\sigma_p^B$ . Условная сила воздействия кромки лезвия одного условного консольного ножа, необходимая для преодоления сцепления грунта объёмом один кубический метр,

$$F_{отркнс} = \sigma_p^B S_{отркнс}. \quad (4)$$

Примем величину перемещения грунта при отрыве  $h_{отр}$ . Энергия на преодоление сцепления пласта с массивом воздействием кромки лезвия консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$u_{отркнс} = F_{отркнс} h_{отр}. \quad (5)$$

*Энергия на создание щели в массиве грунта*

На рисунке 2, а показана схема образования щели в массиве грунта от воздействия на него консольного ножа.

При его перемещении в массиве грунта образуется щель. Щель в массиве создаёт не только кромка лезвия консольного ножа, но и его фаска. Отнесём затраты энергии на создание щели в массиве грунта только на кромку лезвия консольного ножа. Примем ширину щели в массиве равной среднестатистической длине микроотрыва [24]  $b_{щ} = l_{отр}$ . Заменяем дискретный разрыв массива грунта одновременным явлением так, как будто сразу разорван массив и в грунте образовалась щель площадью, равной площади разрыва массива при разработке 1 м<sup>3</sup> грунта. Общая длина щели в массиве грунта объёмом один кубический метр  $l_{щконс} = s_k$ . Площадь щели в массиве грунта от воздействия кромки лезвия консольного ножа

$$S_{щконс} = b_{щ} l_{щконс} \tag{6}$$

Условная сила, необходимая для создания щели в массиве грунта воздействием кромки лезвия консольного ножа

$$F_{щконс} = \sigma_p^B S_{щконс} \tag{7}$$

Примем величину перемещения грунта при создании щели в массиве  $h_{щ}$ . Энергия на создание щели в массиве при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$u_{щконс} = F_{щконс} h_{щ} \tag{8}$$

*Затраты энергии на деформацию части массива грунта*

Консольный нож при перемещении создаст в массиве грунта напряжения сдвига по линии АВ (рисунок 2, б), направленной к вертикали под углом трения грунта о грунт [24]. Из рисунка ширина площади сдвига грунта была бы  $l_{AB} = 353,5 \text{ мм}$ , величина сдвига  $s_{сдконс} = 4 \text{ мм}$  (см. рисунок 2, а). Так как толщина консольного ножа небольшая, реального сдвига грунта не произойдёт, а произойдёт лишь накопление в грунте упругого потенциала. Рассчитать затраты энергии на накопление упругого потенциала сложно, поэтому затратами энергии на деформацию части массива грунта пренебрегаем. Их можно учесть в расчёте общих затрат энергии на перемещение консольного ножа поправочным коэффициентом.

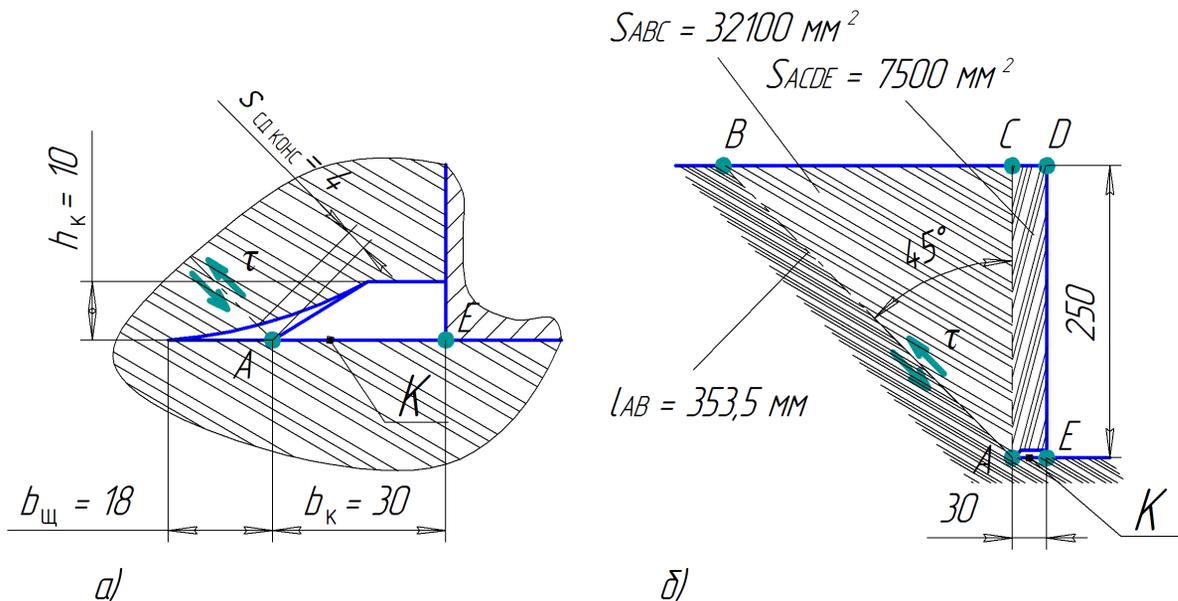


Рисунок 2 – Схема: а – образование щели в массиве грунта от воздействия на него консольного ножа «К»; б – появление касательных напряжений сдвига в массиве грунта, на который воздействует консольный нож

Figure 2 – Scheme: a – formation of a gap in the soil mass from exposure to him console knife «K»; b – the appearance of shear stresses in the soil mass, which is affected by the cantilever knife

*Затраты энергии на преодоление трения грунта о кромку лезвия консольного ножа, общие затраты энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом*

Выявленные условные силы  $F_{отрконс}$  и  $F_{щконс}$  являются распределёнными. Заменяем их на сосредоточенные силы, приложенные к середине кромки лезвия консольного ножа. Эти условные силы лежат в плоскости, перпендикулярной передней поверхности, то есть верхней фаске лезвия консольного ножа. Составим пространственную схему условных сил (рисунок 3).

К силе  $F_{отрконс}$  прибавим силу  $F_{щконс}$ , получим условную нормальную реакцию кромки лезвия консольного ножа на воздействие грунта. Спроецировав её на продольно-вертикальную плоскость, получим проекцию условной нормальной реакции кромки лезвия консольного ножа  $N_{\Sigma кконс}$ .

Нанесём оси (тонкие стрелки). Направим ось  $x$  в сторону перемещения ковша, горизонтальную ось  $y$  перпендикулярно перемещению ковша, а ось  $z$  – вверх. Спроецировав сумму условных сил  $F_{отрконс}$  и  $F_{щконс}$  на оси, определим величины её проекций, которые могут потребоваться для расчётов:  $F_{кх}$ ,  $F_{кy}$ ,  $F_{кz}$  и соотношения этих проекций к сумме условных сил  $F_{отрконс}$  и  $F_{щконс}$ . Из пространственной схемы

сил: проекция, направленная в сторону перемещения ковша,  $F_{кх} = 0,389(F_{отрконс} + F_{щконс})$ ; горизонтальная проекция, направленная перпендикулярно перемещению ковша  $F_{кy} = 0,389(F_{отрконс} + F_{щконс})$ ; вертикальная проекция –  $F_{кz} = 0,834(F_{отрконс} + F_{щконс})$ .

Условная сила трения направлена в сторону перемещения ковша, параллельно оси  $x$ :

$$F_{\Sigma трконс} = f_{с-г} N_{\Sigma кконс}. \tag{9}$$

Путь консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр  $s_k$ . Нормальную силу  $N_{\Sigma крпр}$  приведём к расстоянию микроотрыва  $l_{отр}$ , используя пропорцию:  $\frac{N_{кконс}}{N_{\Sigma кконс}} = \frac{l_{отр}}{s_k}$ . Откуда

$$N_{кконс} = N_{\Sigma кконс} \frac{l_{отр}}{s_k}. \tag{10}$$

Сила трения кромки лезвия консольного ножа о грунт

$$F_{трконс} = f_{с-г} N_{кконс}. \tag{11}$$

Энергия на преодоление трения о кромку лезвия консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$u_{трконс} = F_{трконс} s_k. \tag{12}$$

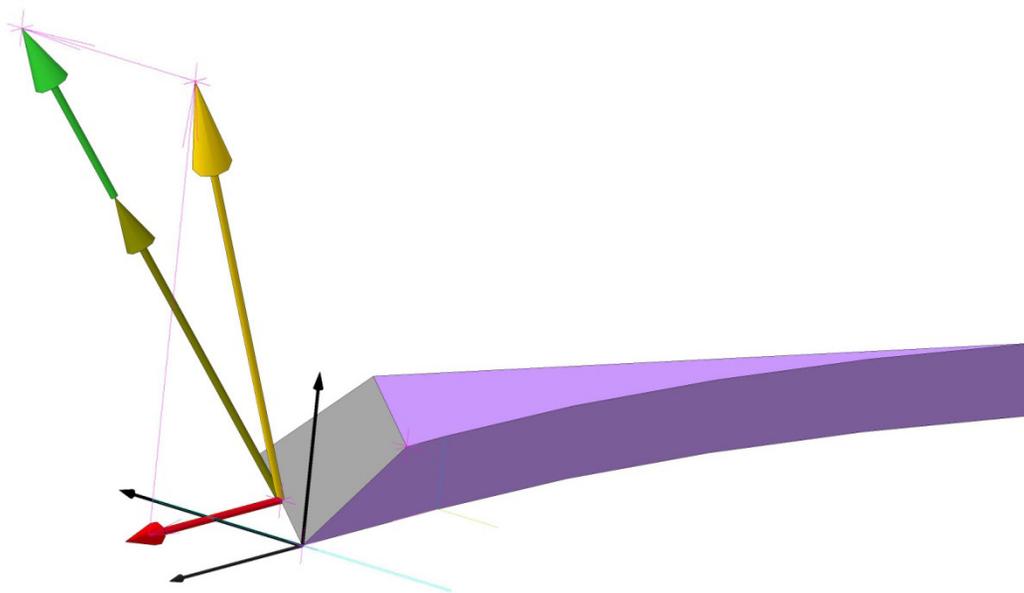


Рисунок 3 – Пространственная схема сил воздействия на грунт кромки лезвия консольного ножа

Figure 3 – Spatial diagram of the forces of action on the ground edge of the blade of the console knife

Общие затраты энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр

$$u_{\text{ткрконс}} = u_{\text{отрконс}} + u_{\text{щконс}} + u_{\text{ткрконс}} \quad (13)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Известные результаты предыдущих расчётов [1]: ширина захвата лезвия консольного ножа  $b_k = 30$  мм, максимальная глубина срезаемого слоя грунта  $h_{\text{сл}} = 0,25$  м, скорость цепей  $v_{\text{ц}} = 1,686$  м/с. Для разработки одного кубического метра грунта консольный нож должен переместиться на расстояние (1):

$$s_k = \frac{1}{0,03 \cdot 0,25} \approx 133 \text{ м/м}^3.$$

Так как скорость ковша равна скорости цепей  $v_k = v_{\text{ц}} = 1,686$  м/с, то время перемещения ковша на расстояние  $s_k$  (2):  $\tau_k = \frac{133}{1,686} \approx 78,885$  с/м<sup>3</sup>.

Площадь отрыва пласта от воздействия кромки лезвия консольного ножа (3):

$$S_{\text{отрконс}} = 0,03 \cdot 133 \approx 4 \text{ м}^2/\text{м}^3 = 4000000 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Примем для зажатого резания со скольжением предел прочности грунта III категории на растяжение  $\sigma_p^B = 0,12$  МПа. Условная сила воздействия кромки лезвия одного условного консольного ножа, необходимая для отрыва пласта от массива грунта объёмом один кубический метр (4):

$$F_{\text{отрконс}} = 0,12 \cdot 4000000 = 480000 \text{ Н/м}^3.$$

Примем величину перемещения пласта грунта при отрыве  $h_{\text{отр}} = 1$  мм. Энергия на преодоление сцепления пласта с массивом при разработке грунта объёмом один кубический метр (5):

$$u_{\text{отрконс}} = 480000 \cdot 0,001 = 480 \text{ Дж/м}^3.$$

Общая длина щели в массиве грунта объёмом один кубический метр  $l_{\text{щконс}} = s_k = 133$  м/м<sup>3</sup>. Площадь щели в массиве грунта от воздействия кромки лезвия консольного ножа (6):

$$S_{\text{щконс}} = 0,018 \cdot 133 = 2,394 \text{ м}^2/\text{м}^3 = 2394000 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Условная сила, необходимая для создания

щели в массиве грунта воздействием лезвия консольного ножа (7):

$$F_{\text{щконс}} = 0,12 \cdot 2394000 = 287280 \text{ Н/м}^3.$$

Примем величину перемещения грунта при создании щели в массиве  $h_{\text{щ}} = 1$  мм. Энергия на создание щели в массиве при разработке грунта объёмом один кубический метр (8):

$$u_{\text{щконс}} = 287280 \cdot 0,001 \approx 287 \text{ Дж/м}^3.$$

Из рисунка 3 проекция условной нормальной реакции кромки лезвия консольного ножа  $N_{\text{скконс}} = 688000$  Н/м<sup>3</sup> (жёлтый вектор). Допустим, коэффициент трения грунта о сталь  $f_{\text{с-г}} = 0,5$ . Условная сила трения (красный вектор) (9):

$$F_{\text{ткрконс}} = 0,5 \cdot 688000 = 344000 \text{ Н/м}^3.$$

Величины проекций суммы условных сил  $F_{\text{отрконс}}$  и  $F_{\text{щконс}}$  на оси и соотношения этих проекций к сумме условных сил:  $F_{\text{кx}} = 290800$  Н/м<sup>3</sup>,  $F_{\text{кx}} = 0,389(F_{\text{отрконс}} + F_{\text{щконс}})$ ;  $F_{\text{кy}} = 290800$  Н/м<sup>3</sup>,  $F_{\text{кy}} = 0,389(F_{\text{отрконс}} + F_{\text{щконс}})$ ;  $F_{\text{кz}} = 623400$  Н/м<sup>3</sup>,  $F_{\text{кz}} = 0,834(F_{\text{отрконс}} + F_{\text{щконс}})$ .

Путь консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр  $s_k = 133$  м. Условную нормальную силу  $N_{\text{скрп}}$  приведём к расстоянию микроотрыва  $l_{\text{отр}} = 0,018$  м (10):

$$N_{\text{кконс}} = 688000 \frac{0,018}{133} = 93 \text{ Н}.$$

Сила трения (11):

$$F_{\text{ткрконс}} = 0,5 \cdot 93 = 46,5 \text{ Н}.$$

Энергия на преодоление трения грунта о кромку лезвия консольного ножа при разработке грунта объёмом один кубический метр (12):

$$u_{\text{ткрконс}} = 46,5 \cdot 133 = 6185 \text{ Дж/м}^3.$$

Общие затраты энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр (13):

$$u_{\text{ткрконс}} = 480 + 287 + 6185 = 6952 \text{ Дж/м}^3.$$

Структура затрат энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр показана на рисунке 4.



Рисунок 4 – Структура затрат энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр: затраты энергии на отделение пласта от массива грунта 7%, на создание щели в массиве грунта 4%, на преодоление трения кромки лезвия о грунт 89%

Figure 4 – The structure of energy costs when the blade edge of the cantilever blade interacts with the ground when developing soil with a volume of one cubic meter: energy costs for separating the formation from the soil mass 7%, to create a gap in the soil mass of 4%, to overcome friction of the edge of the blade on the ground 89%

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общие затраты энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом при разработке грунта объёмом один кубический метр около 7 тыс. Дж/куб.м. В структуре затрат энергии при взаимодействии кромки лезвия консольного ножа с грунтом преобладают затраты энергии на преодоление трения грунта о кромку лезвия. Для определения общих затрат энергии на резание грунта консольными ножами ковшей агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги нужно проанализировать взаимодействие с грунтом других элементов консольных ножей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николаев В.А. Определение скорости цепей и размеров пласта грунта, отрезаемого ковшем агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги // Вестник СибАДИ, 2020. №1. С. 32–43.
2. Карасёв Г.Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. №4. С. 36–42.
3. 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.
4. Кравец И.М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // Строительные и дорожные машины. 2010. №5. С. 47–49.

5. 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.

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

7. 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.

8. 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.

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

10. 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.

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

12. 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.

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

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

15. 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.

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

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

18. 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.

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

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

21. 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.

22. 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.

23. 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.

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

## REFERENCES

1. Nikolaev V.A. Soil layer cut off by the aggregate for removing the topsoil from the road sublayer: determination of the chain speed and sizes. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(1):32-43. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-32-43> (In Russ.).

2. Karasjov G.N. Opredelenie sily rezanija grunta s uchjotom uprugih deformatsij pri razrushenii [Determining of the cutting force of soil considering elastic deformation at fracture]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2008; 4: 36–42 (in Russian).

3. Karnauhov A.I., Orlovskij S.N. Opredelenie zatrat udel'noj jenergii na process rezanija lesnyh pochv torcevyymi frezami [Determining specific energy costs on the cutting process of forest soils with end mills]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 1: 20–22 (in Russian).

4. Kravec I.M. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezanija pri kombinirovannom rezanii gruntov

gidrofrezoj [Determining critical cutting depth when combined cutting soils with a hydromiller]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 5: 47–49 (in Russian).

5. Kirillov F.F. Determinirovannaja matematicheskaja model' vremennogo raspredelenija tjagovogo usilija dlja mnogorezcovykh rabochih organov zemlerojnyh mashin [A deterministic mathematical model of the temporal distribution of traction for multicutting working elements of earth-moving machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 44–48 (in Russian).

6. Berestov E.I. Vlijanie trenija grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniju [Influence of friction of soil on the surface of the knife cutting resistance]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 34–38 (in Russian).

7. Vershinin A.V., Zubov V.S., Tjul'nev A.M. Povyshenie jeffektivnosti diskofrezernyh rabochih mehanizmov dlja razrabotki mjorzlyh gruntov [Efficiency improvement of the disk milling working mechanisms for the development of frozen soil]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2012; 8: 42–44 (in Russian).

8. Balovnev V.I., Nguen Z.Sh. Opredelenie soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelju prochnosti [Determining of resistances when excavating soils with a ripper according to a combined indicator of strength]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2005; 3: 38–40 (in Russian).

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

10. 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.

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

12. 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.

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

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

15. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.Ju. Issledovanie upravljajemyh nozhevyyh sistem zemlerojno-transportnyh mashin [The study of controlled knife systems of ground-moving machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2017; 2: 12–15 (in Russian).

16. Nilov V.A., Fjodorov E.V. Razrabotka grunta skreperom v uslovijah svobodnogo rezanija [Soil excavation with a scraper in free cutting conditions]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 2: 7–10 (in Russian).

17. Chmil' V.P. Nasosno-akkumuljativnyj privod ryhlitelja s avtomaticheskim vyborom ugla rezanija [Pump-accumulating ripper drive with automatic cutting angle selection]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 11: 18–20 (in Russian).

18. Kabashev R.A., Turgumbaev S.D. Jeksperimental'nye issledovanija processa kopanija gruntov rotornno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostatcheskim davleniem [Experimental studies of the process of digging soils by rotary-disk working elements under hydrostatic pressure]. *Vestnik SibADI*. 2016; 4: 23–28 (in Russian).

19. Sjomkin D.S. O vlijanii skorosti rabocheho organa na silu soprotivlenija rezaniju grunta [About the impact of the speed of the working element on the resistance strength of ground cutting]. *Vestnik SibADI*. 2017; 1: 37–43 (in Russian).

20. Konstantinov Ju.V. Metodika raschjota soprotivlenija i momenta soprotivlenija rezaniju pochvy prjamym plastinchatym nozhom frezy [The method of calculating resistance and the moment of resistance to soil cutting with a straight plate cutter knife]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2019; 5: 31–39 (in Russian).

21. Syromjatnikov Ju.N., Hramov I.S., Vojnash S.A. Gibkij jelement v sostave rabochih organov rotornnoj pochvoobrabatyvajushhej ryhlitel'no-separirujushhej mashiny [Flexible element in the working elements of the rotary soil processing rippering and separating machine]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 5: 32–39 (in Russian).

22. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoj analiz mehanizmov peremeshhenija rabochih organov pochvoobrabatyvajushhih mashin po zadannoju traektorii

[Power analysis of the mechanisms of movement of working elements of soil processing machines on a predicted trajectory]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 1: 47–54 (in Russian).

23. Dranjaev S.B., Chatkin M.N., Korjavin S.M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvajushhej frezy [Simulation of the work of a helical G-shaped knife soil cutter]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017; 7: 13–19 (in Russian).

24. Nikolayev V.A. Mashiny dlya obrabotki pochvy. Teoriya i raschot [Soil processing machines. Theory and calculation]. Yaroslavl, Izd. FGBOU VO YAGSKHA, 2014. 358 p. (in Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*Vladimir A. Nikolaev – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Construction and Road Machines' Department, Yaroslavl State Technical University (Yaroslavl, 88, Moskovskii prospekt., e-mail: Nikolaev53@inbox.ru).*