

УДК 625.08

2.5.11 Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЛЕЗВИЯ НОЖА БУЛЬДОЗЕРА В НАЧАЛЕ ПРОХОДА

В. А. Николаев

Ярославский технический университет, Ярославль, Россия

## DETERMINATION OF ENERGY CONSUMPTION FOR MOVING THE BULLDOZER KNIFE AT THE BEGINNING OF THE PASSAGE

Vladimir A. Nikolayev

Yaroslavl Technical University, Yaroslavl, Russia

**Аннотация.** Для удаления камней, кустов, деревьев с полосы отвода будущей дороги целесообразно использовать агрегаты с бульдозерным оборудованием. Хотя теоретические основы разработки грунта весьма подробно рассмотрены, основываясь на них, сложно выявить и сопоставить частные затраты энергии воздействия на грунт элементов технических средств. Не зная величины частных затрат энергии при работе каждого элемента рабочего органа, осмысленно его совершенствовать не представляется возможным. Целью предлагаемого теоретического исследования является подробный анализ взаимодействия с грунтом лезвия ножа существующего бульдозерного отвала для последующего совершенствования бульдозерного оборудования, объект исследования – процесс взаимодействия с грунтом лезвия ножа.

В предлагаемой схеме резание грунта осуществляется с микросдвигами. В зависимости от свойств грунта и скорости агрегата в грунте будет преобладать деформация псевдосдвига, объемного сжатия, смятия. Для определения силы, необходимой для смятия, сжатия и псевдосдвига грунта в наклонной поверхности, используем условный обобщенный предел прочности грун-

**Abstract.** To remove stones, bushes, trees from the right-of-way of the future road it is advisable to use machines with bulldozer equipment. Theoretical basis for excavation has been considered in detail, however, based on it, it is difficult to identify and compare the partial energy costs of the impact on the ground by the elements of equipment. Without knowing the value of partial energy consumption during the operation of each element of the work tool, it is impossible to improve it in a reasonable way. The purpose of the proposed theoretical study is a detailed analysis of the interaction of the soil and the knife of the bulldozer blade for the subsequent improvement of bulldozer equipment. The object of the study is the process of interaction between the soil and the knife.

In the proposed scheme, soil cutting is carried out with micro-shiftings. Depending on soil properties and machine velocity, deformations of pseudo-displacement, volume compression, crumpling will predominate in the soil. To determine the force required for crumpling, compression and pseudo-displacement of the soil in a sloping surface, we use the conditional generalized limit of soil crumpling strength. After determining, the force required for pseudo-displacement the soil in a sloping surface,

та на смятие. Определив силу, необходимую для псевдосдвига грунта в наклонной поверхности, определяем затраты энергии на первичное смятие и псевдосдвиг одного кубического метра грунта. Затем определяем усилие первичного сдвига грунта краем ножа бульдозера и соответствующие затраты энергии. Вычисляем общие затраты энергии, мощность на перемещение лезвия ножа бульдозера.

На основе разработанной методики определены затраты энергии: на первичное смятие и псевдосдвиг одного кубического метра грунта, на сдвиг грунта в продольно-вертикальной плоскости краем ножа, общие затраты энергии, мощность на перемещение лезвия ножа бульдозера при различном его заглублении. Построены и аппроксимированы соответствующие зависимости. Расчет затрат энергии на перемещение лезвия ножа бульдозера позволит в дальнейшем определить общие затраты энергии с целью модернизации бульдозерного оборудования, направленной на уменьшение этих затрат.

**Ключевые слова:** бульдозерное оборудование, нож бульдозера, резание грунта, анализ процесса резания, затраты энергии на псевдосдвиг, затраты энергии на сдвиг краем ножа, общие затраты энергии

we identify the energy consumption for the initial crumpling and pseudo-displacement of one cubic meter of soil. Then we determine the primary shear strength of the soil by edge of the bulldozer knife and the corresponding energy consumption; calculate the total energy costs and power to move the bulldozer knife.

Based on the developed methodology, has been determined the energy consumption for primary crumpling and pseudo-displacement of one cubic meter of soil, for shifting the soil in the longitudinal-vertical plane by the knife edge, the total energy consumption, power to move the knife of the bulldozer blade at different depths. The corresponding functions are constructed and approximated.

Calculation of energy consumption for moving the bulldozer knife will allow to determine the total energy consumption in order to upgrade the bulldozer equipment for reducing the costs in the future.

**Key words:** bulldozer equipment, bulldozer knife, soil cutting, cutting process analysis, energy consumption for pseudo-displacement, energy consumption for shifting with knife edge, total energy costs

**Для цитирования:** Николаев, В. А. Определение затрат энергии на перемещение лезвия ножа бульдозера в начале прохода / В. А. Николаев. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-90-103. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 4 (106). – С. 90–103.

**For citation:** Nikolayev, V. A. (2023). Determination of energy consumption for moving the bulldozer knife at the beginning of the passage. Architecture, Construction, Transport, (4(106)), pp. 90-103. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-90-103.

## Введение

Для удаления камней, кустов, деревьев с полосы отвода будущей дороги, обнажения подстилающего слоя используют агрегаты с бульдозерным оборудованием. Существующие агрегаты малопроизводительны, поэтому часто они ограничивают темп строительства. Для разработки грунта, перемещения призмы волочения необ-

ходимы большие затраты энергии. В связи этим существует необходимость совершенствования бульдозерного оборудования.

Теоретические основы разработки грунта весьма подробно рассмотрены. Сформулированы общие подходы к проблеме [1, 2], в частности исследовано влияние на затраты энергии трения грунта о нож [3, 4]. В. И. Баловнев [5, 6] оценивает

взаимодействие рабочих органов с грунтом по интегральному показателю прочности. Кроме этого, рассмотрено влияние скорости рабочего органа на силу сопротивления резанию грунта при свободном резании [7, 8], взаимодействие с грунтом рабочих органов землеройных машин непрерывного действия [9], в том числе с активными рабочими органами [10, 11]. Однако в исследованиях резания грунта авторы применяют преимущественно синтезный метод, рассматривая рабочий орган в целом. Недостаток этого метода заключен в сложности оценки частных затрат энергии при работе каждого элемента рабочего органа. Чтобы выявить и сопоставить частные затраты энергии воздействия на грунт элементов технических средств, следует применить анализный метод. Целью предлагаемого теоретического исследования является подробный анализ взаимодействия с грунтом лезвия ножа существующего бульдозерного оборудования [12, 13] для его последующего совершенствования.

Лезвие ножа совершает [14] (рис. 1а):

- смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта по наклонной поверхности, след которой в продольно-вертикальном сечении АН;
- сдвиг грунта в условной плоскости АВСН краем ножа;
- создание щели в массиве грунта с одного края прохода ножа при полузажатом резании или по краям прохода при зажатом резании;
- подъем края массива грунта с одного края прохода ножа при полузажатом резании или по краям прохода при зажатом резании;
- преодоление силы инерции разрабатываемого грунта;
- преодоление силы трения грунта о лезвие.

Во-первых, явный сдвиг грунта в наклонной плоскости, след которой в продольно-вертикальном сечении АН, маловероятен в связи с большой длиной следа поверхности сдвига. Поэтому назовем это явление псевдосдвигом. Во-вторых, в сравнении с затратами энергии на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта в плоскости, след которой в продольно-вертикальном

сечении АН, а также сдвиг грунта краем ножа в условной плоскости АВСН остальные затраты энергии незначительны. Их вычисление весьма трудоемко. Поэтому целесообразно рассчитать затраты энергии на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта, сдвиг грунта краем ножа, а прочие затраты энергии: на создание щели в массиве грунта с одного края прохода ножа, подъем края массива грунта, преодоление силы инерции разрабатываемого грунта, преодоление силы трения грунта о лезвие, – учесть поправочным коэффициентом  $k_{сд+}=1.1$ .

### Объект и методы исследования

Объектом исследования является процесс взаимодействия с грунтом лезвия ножа. Общие затраты энергии на этот процесс включают частные затраты энергии.

*Затраты энергии на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта по наклонной поверхности, след которой в продольно-вертикальном сечении АН (рис. 1а)*

В предлагаемой схеме резание грунта осуществляется с микросдвигами. Между микросдвигами грунт неподвижен на лезвии. В момент микросдвига грунт резко перемещается по лезвию на расстояние микросдвига. Накопленный в грунте от воздействия лезвия ножа упругий потенциал реализуется через смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта [9, 10]. В зависимости от свойств грунта и скорости агрегата будет преобладать в грунте деформация сдвига, объемного сжатия, смятия. Применение условного обобщенного предела прочности  $\sigma_{см усл}^B$  на смятие удобно для расчетов, так как в расчетной схеме можно выявить поверхность смятия. Выявить поликриволинейную поверхность псевдосдвига грунта значительно сложнее. Еще сложнее выявить области объемного сжатия грунта от воздействия лезвия ножа бульдозера. Поэтому для определения силы, необходимой для смятия, сжатия и псевдосдвига грунта в наклонной поверхности, след которой в продольно-вертикальном сечении АН, используем условный обобщенный предел прочности грунта на смятие:



где  $l_{cd-50}$  – длина следа  $АН$  в продольно-вертикальном сечении (рис. 1а) при глубине хода ножа  $a = 0.05$  м;

$l_{cdi}$  – длина следа  $АН$  в продольно-вертикальном сечении при  $i$  глубине хода ножа бульдозера.

С другой стороны, следует учесть влияние объемного сжатия грунта. Приложим силы, вызывающие объемное сжатие, по направлению, параллельному передней поверхности лезвия ножа (рис. 1а). На участок  $АВСН$  первичного псевдосдвига сверху действует распределенная нагрузка, вызванная действием проекций совокупности сил [13]: смещения грунта  $F_{cm'}$  тяжести смещаемого грунта  $G_{cm'}$  противодействия инерции грунта  $F_j$ . Сила ускорения смещаемого грунта  $F_y$  увеличивает объемное сжатие грунта на участке  $АВСН$ . Сложив эти силы (рис. 1b), определим сосредоточенную силу воздействия пласта  $Q_{nl'}$  которой заменим распределенную нагрузку. Перенесем в соответствующем масштабе силу  $Q_{nl'}$  на рис. 1а. Направление этой силы параллельно поверхности ножа, а точка  $K$  ее приложения расположена на следе центра масс смещаемого грунта. Сложив ее с силой преодоления трения грунта  $F_{mn}$  о поверхность ножа и нижней части отвала, приложенной к точке  $B$ , получим суммарную силу воздействия грунта  $T$  на участок  $АВСН$  первичного псевдосдвига со стороны участка  $BCDE$  смещаемого грунта.

Точку  $L$  приложения силы  $T$  определим из пропорции (рис. 1):

$$l_T = l_{nl} \frac{Q_{nl'}}{T}. \quad (4)$$

Определив силу  $F_c$ , необходимую для псевдосдвига грунта в наклонной поверхности, след которой в продольно-вертикальном сечении  $АН$ , по формуле (1), учитывая длину следа псевдосдвига грунта, и сопоставив ее с силой  $T$ , определим степень влияния объемного сжатия на силу, необходимую для смятия, сжатия и псевдосдвига грунта по наклонной поверхности  $АН$ . Предположим, сила, необходимая для смятия, сжатия и псевдосдвига грунта по наклонной поверхности  $АН$ :

$$F_{c+} = k_{ock} F_c, \quad (5)$$

где  $k_{ock}$  – коэффициент учета объемного сжатия пласта грунта.

$$k_{ock} = 1 + \frac{T}{F_c}. \quad (6)$$

Горизонтальная сила:

$$F_{c+zop} = F_{c+} \cos \psi_B, \quad (7)$$

где угол  $\psi_B = 14^\circ$  получен из рис. 1а.

Затраты энергии на первичное смятие и псевдосдвиг одного кубического метра грунта по поверхности сдвига, след которой в продольно-вертикальном сечении  $АН$ :

$$u_{cdAH} = F_{c+zop} s, \quad (8)$$

где  $s$  – путь агрегата, необходимый для разработки одного кубического метра грунта.

*Затраты энергии на сдвиг грунта в продольно-вертикальной плоскости  $АВСН$  краем ножа (рис. 1а)*

Так как сдвиг пласта состоит из периодических микросдвигов, при вычислении затрат энергии на сдвиг грунта следует сделать поправку на коэффициент микросдвигов  $k_{мcd} \approx 1.5$  [9]. Коэффициент микросдвигов учитывает затраты энергии на накопление в грунте упругого потенциала. Проявления этой энергии визуальным образом не выражаются, так как энергия рассеивается в грунте, то есть происходит ее диссипация.

Усилие первичного сдвига грунта краем ножа бульдозера:

$$F_{cd} = k_{мcd} \tau_{cd}^B S_{cdKH}, \quad (9)$$

где  $S_{cdKH}$  – площадь сдвига грунта кромкой ножа,  $\tau_{cd}^B$  – предел прочности грунта на сдвиг.

Горизонтальная сила:

$$F_{cdzop} = F_{cd} \cos \psi_B, \quad (10)$$

где угол  $\psi_B = 14^\circ$ , получен из рис. 1а.

Затраты энергии на первичный сдвиг грунта краем ножа объемом один кубический метр в плоскости  $АВСН$ :

$$u_{cdABCH} = F_{cdzop} s, \quad (11)$$

где  $s$  – путь агрегата, необходимый для разработки одного кубического метра грунта.

Общие затраты энергии, мощность, сила тяги

Общие затраты энергии, необходимой для первичного смятия, псевдосдвига и сдвига одного кубического метра грунта лезвием бульдозера:

$$u_{\Sigma cд} = k_{cд+} (u_{cдAH} + u_{cдABCH}), \quad (12)$$

где  $k_{cд+}$  – поправочный коэффициент учета прочих затрат энергии: на создание щели в массиве грунта с одного края прохода ножа, подъем края массива грунта, преодоление силы инерции разрабатываемого грунта, преодоление силы трения грунта о лезвие ножа.

Мощность, затрачиваемая трактором на резание грунта ножом:

$$N_{cд} = \frac{u_{\Sigma cд}}{\tau}, \quad (13)$$

где время  $\tau$ , необходимое для разработки одного кубического метра грунта бульдозером, определяется делением пути  $s$ , необходимого для разработки одного кубического метра грунта, на скорость агрегата  $v_a$ :

$$\tau = \frac{s}{v_a}. \quad (14)$$

На рис. 1а силу  $F_{c+}$ , необходимую для смятия, сжатия и псевдосдвига грунта, направим по следу псевдосдвига  $AH$ . Силу первичного сдвига грунта  $F_{cд}$  краем ножа бульдозера направим параллельно следу псевдосдвига  $AH$  из точки  $J$ , делящей проекцию лезвия ножа  $AB$  пополам. Эти силы в совокупности с силой  $T$  вызывают распределенную нагрузку  $q$  противодействия массива грунта перемещению лезвия ножа, которую приведем к сосредоточенной силе  $Q_{z зр}$ . Сложив на рис. 1с силы  $F_{c+}$ ,  $F_{cд}$  и  $T$ , получим силу  $Q_{z зр}$ . Силу тяги трактора  $F_{тяги л зр}$  для осуществления первичного смятия, псевдосдвига и сдвига грунта лезвием ножа бульдозера получим сложением сил  $F_{c+}$  и  $F_{cд}$  (рис. 1d) и проецированием на горизонталь.

Полученные из построений силы  $Q_{z зр}$ ,  $F_{тяги л зр}$ ,  $F_{л в зр}$  следует увеличить, умножив на поправочный коэффициент учета прочих затрат энергии  $k_{cд+}$ :

$$Q_{z зр}, F_{тяги л зр}, F_{л в зр} = k_{cд+} (Q_{z зр}, F_{тяги л зр}, F_{л в зр}), \quad (15)$$

где  $(Q_{z зр}, F_{тяги л зр}, F_{л в зр})$  – значения соответствующих сил, полученные графическим путем. Точку

$U$  приложения горизонтальной силы  $Q_{z зр}$  противодействия массива грунта перемещению лезвия ножа вычислим из условия равновесия моментов относительно точки  $A$ :

$$h_Q = \frac{T \cdot l_T + F_{cд} \cdot l_F + G_{cд} \cdot l_G}{Q_{z зр}}, \quad (16)$$

где  $G_{cд}$  – сила тяжести участка грунта, площадь сечения которого в продольно-вертикальной плоскости  $ABCH$ :

$$G_{cд} = g p B S_{ABCH}. \quad (17)$$

Сила сопротивления  $Q$  массива грунта перемещению лезвия ножа направлена не горизонтально, а отклонена на угол  $\beta$  (рис. 1с). Вертикальная сила воздействия лезвия на грунт  $F_{л в зр}$  направлена вверх (рис. 1d). Равная ей сила воздействия грунта на лезвие направлена вниз.

### Результаты

Для расчета примем следующие исходные данные. Грунт – суглинки плотностью  $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ . Движение агрегата со скоростью  $v_a = 1 \text{ м/с}$ . Ширина отвала  $B = 2.5 \text{ м}$ . Примем начальный условный предел прочности грунта на смятие с учетом напряжений псевдосдвига  $\sigma_{см нач усл}^B = 0.6 \text{ МПа}$  при заглублении ножа  $a = 50 \text{ мм}$ ; предел прочности грунта на первичный сдвиг лезвием ножа бульдозера при полузажатом резании  $\tau_{cд}^B = 0.8 \text{ МПа}$ . Расстояние микросдвига  $18 \text{ мм}$ . Коэффициент микросдвигов  $k_{мcд} = 1.5$ . Поправочный коэффициент учета прочих затрат энергии  $k_{cд+} = 1.1$ . Глубина разработки грунта  $a = 0.05 \text{ м}$ .

*Затраты энергии на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта по наклонной поверхности, след которой в продольно-вертикальном сечении  $AH$*

Площадь смятия пласта грунта ножом бульдозера на расстоянии микросдвига (2):

$$S_c = 2500 \cdot 18 = 45000 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Сила, необходимая для смятия с учетом псевдосдвига грунта в наклонной поверхности, след которой в продольно-вертикальном сечении  $AH$  (1):

$$F_c = 0.6 \cdot 45000 = 27000 \text{ (Н)}.$$

Сложив силы смещения грунта  $F_{cm}$  (рис. 1b), тяжести смещаемого грунта  $G_{cm}$ , противодействия ножа инерции грунта  $F_j$ , ускорения смещаемого грунта  $F_y$ , определим сосредоточенную силу воздействия смещаемого пласта  $Q_{nl}$  [10] на пласт грунта, подвергающийся псевдосдвигу. Сосредоточенной силой  $Q_{nl}$  заменим распределенную нагрузку. Перенесем в соответствующем масштабе силу  $Q_{nl}$  на рис. 1а, направив ее на след луча ОК, параллельного передней поверхности ножа и проходящего через центр масс участка смещаемого грунта. Сила  $Q_{nl} = 1\,336\text{ Н}$ . Сложив силу  $Q_{nl}$  с силой  $F_{mn} = 1\,033\text{ Н}$  [10] преодоления трения грунта о поверхность ножа и нижнюю часть отвала, получим суммарную силу воздействия грунта  $T$  на участок ABCN первичного псевдосдвига со стороны участка BCDE смещения грунта:

$$T = 1\,336 + 1\,033 = 2\,369\text{ (Н)}.$$

Из рис. 1а плечо силы  $Q_{nl}$ :  $l_{nl} = 50\text{ мм}$ . Точку L приложения силы  $T$  определим из пропорции (4):

$$l_T = 50 \cdot \frac{1\,336}{2\,369} = 28\text{ (мм)}.$$

Коэффициент учета объемного сжатия пласта грунта (6):

$$k_{ож} = 1 + \frac{2\,369}{27\,000} = 1.088.$$

Сила, необходимая для смятия, сжатия и псевдосдвига грунта по наклонной поверхности AN (5):

$$F_{c+} = 1.088 \cdot 27\,000 = 29\,369\text{ (Н)}.$$

Горизонтальная сила (7):

$$F_{c+гор} = 29\,369 \cdot \cos 14^\circ = 28\,497\text{ (Н)}.$$

Путь бульдозера, необходимый для разработки одного кубического метра грунта:

$$s = \frac{V}{B \cdot a} = \frac{1}{2.5 \cdot 0.05} = 8\text{ (м)}.$$

Затраты энергии на первичный сдвиг грунта объемом один кубический метр в поверхности сдвига, наклоненной к горизонтали под углом (8):

$$u_{сдАН} = 28\,497 \cdot 8 = 227\,969\text{ (Дж / м}^3\text{)}.$$

*Затраты энергии на сдвиг грунта в продольно-вертикальной плоскости ABCN краем ножа*

Площадь сечения  $S_{ABCN}$  сдвига грунта правой или левой кромкой ножа возьмем из рис. 1а. Если

заглубление ножа 50 мм, площадь поверхности сдвига грунта кромкой ножа  $S_{сдкН} = 2\,882\text{ мм}^2$ . Предел прочности грунта на первичный сдвиг лезвием ножа бульдозера при полузажатом резании  $\tau_{сд}^B = 0.8\text{ МПа}$ . Коэффициент микросдвигов  $k_{мсд} = 1.5$ . Усилие первичного сдвига грунта в продольно-вертикальной поверхности сдвига краем ножа (9):

$$F_{сд} = 1.5 \cdot 0.8 \cdot 2\,882 = 3\,458\text{ (Н)}.$$

Горизонтальная сила (10):

$$F_{сдгор} = 3\,458 \cdot \cos 14^\circ = 3\,355\text{ (Н)}.$$

Путь, необходимый для разработки одного кубического метра грунта,  $s = 8\text{ м}$ . Затраты энергии на первичный сдвиг грунта в продольно-вертикальной поверхности (11):

$$u_{сдABCN} = 3\,355 \cdot 8 = 26\,845\text{ (Дж / м}^3\text{)}.$$

*Общие затраты энергии, мощность, сила тяги*

Поправочный коэффициент учета прочих затрат энергии, кроме энергии на первичный сдвиг грунта,  $k_{сд+} = 1.1$ . Общие затраты энергии, необходимой для первичного смятия, псевдосдвига, объемного сжатия и сдвига одного кубического метра грунта лезвием бульдозера (12):

$$u_{\Sigma сд} = 1.1 \cdot (227\,969 + 26\,845) = 280\,296\text{ (Дж / м}^3\text{)}.$$

Время, необходимое для разработки одного кубического метра грунта бульдозером (14):

$$\tau = \frac{8}{1} = 8\text{ (с)}.$$

Мощность, затрачиваемая трактором на резание грунта лезвием ножа (13):

$$N_{сд} = \frac{280\,296}{8} = 35\,037\text{ (Вт)} \approx 35\text{ (кВт)}.$$

Силу  $F_{c+}$ , необходимую для смятия, сжатия и псевдосдвига грунта, направим по следу псевдосдвига AN (рис. 1а). Силу  $F_{сд}$  первичного сдвига грунта краем ножа бульдозера направим параллельно следу псевдосдвига AN из точки J, делящей проекцию лезвия ножа AB пополам. Сложив эти силы и силу  $T$ , графическим путем получим горизонтальную силу сопротивления массива грунта  $Q_{сд+} = 33\,374\text{ Н}$  (рис. 1с). Поправочный коэффициент  $k_{сд+} = 1.1$ . Горизонтальная сила (15):

$$Q_2 = 1.1 \cdot 33\,374 = 36\,711 \text{ (H)}.$$

Силу тяги трактора  $F_{\text{тяги л гр}}$  (рис. 1d) для осуществления первичного смятия, псевдосдвига и сдвига грунта лезвием ножа бульдозера получим графическим сложением сил  $F_{\text{с+}}$  и  $F_{\text{сд}}$  и проецированием на горизонталь:  $F_{\text{тяги л гр}} = 31\,832 \text{ H}$ . С учетом поправочного коэффициента (15):

$$F_{\text{тяги л}} = 1.1 \cdot 31\,832 = 35\,015 \text{ (H)}.$$

Вертикальная сила воздействия лезвия на грунт:  $F_{\text{л в гр}} = 7\,908 \text{ H}$ . Получена графическим путем. С учетом поправочного коэффициента (15):

$$F_{\text{л в гр}} = 1.1 \cdot 7\,908 = 8\,699 \text{ (H)}.$$

Сила тяжести подвергающегося псевдосдвигу участка грунта, площадь сечения которого в продольно-вертикальной плоскости  $ABCH$  (17):

$$G_{\text{сд}} = 9.8 \cdot 1600 \cdot 2.5 \cdot 3458 \cdot 10^{-6} = 113 \text{ (H)}.$$

Из рис. 1а плечи сил относительно точки  $A$ :  $l_T = 28 \text{ мм}$ ;  $l_F = 7.7 \text{ мм}$ ;  $l_G = 82 \text{ мм}$ . Точку  $U$  приложения горизонтальной силы противодействия массива грунта  $Q_2$  перемещению лезвия ножа вычислим из условия равновесия моментов относительно точки  $A$  (16):

$$h_Q = \frac{2369 \cdot 28 + 3458 \cdot 7.7 + 133 \cdot 82}{36711} = 3.1 \text{ (мм)}.$$

Сила сопротивления массива грунта  $Q$  перемещению лезвия ножа будет направлена не горизонтально (рис. 1а), а отклонена на угол  $\beta = 10.3^\circ$ .

Выполнив аналогичные построения и расчеты, определим параметры при различном заглублении ножа. Они даны в таблицах 1–6.

Таблица 1

Table 1

Суммарная сила воздействия грунта  $T$  на участок  $ABCH$  первичного псевдосдвига со стороны участка  $BCDE$  смещения грунта и ее плечо относительно точки  $A$

Total force  $T$  of ground effect on the  $ABCH$  section of primary pseudo-displacement from the side of the  $BCDE$  section of ground displacement and its shoulder relative to the point  $A$

Глубина, $a$ , м	Сила воздействия смещаемого пласта, $Q_{\text{нр}}$ , Н	Сила трения пласта о поверхность ножа и нижней части отвала, $F_{\text{нр}}$ , Н	Суммарная сила воздействия на псевдосдвигаемый участок грунта, $T$ , Н	Плечо $l_{\text{нр}}$ , мм	Плечо $l_T$ силы $T$ , мм
0.05	1 336	1 033	2 369	50	28
0.1	2 950	2 646	5 596	122	64
0.15	6 806	6 128	12 934	182	96
0.2	12 252	12 020	24 272	248	125
0.25	19 500	19 200	38 700	317	160
0.3	27 820	27 331	55 151	381	192

Таблица 2

Table 2

Затраты энергии на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта ножом  
Energy costs for crumpling, volume compression and pseudo-displacement of soil with a knife

Глубина, $a$ , м	Напряжение в грунте, Н/мм <sup>2</sup>	Сила смятия и псевдосдвига, Н	Сила воздействия смещаемого грунта, Н	Коэффициент учета объемного сжатия	Сила, необходимая для смятия, сжатия и псевдосдвига, Н	Путь бульдозера, необходимый для разработки одного кубического метра грунта, $s$ , м	Объемные затраты энергии на смятие, сжатие и псевдосдвиг грунта, Дж/м <sup>3</sup>
0.05	0.6	27 000	2 369	1.088	29 369	8	227 969
0.1	1.2	54 000	5 596	1.104	59 596	4	209 580
0.15	1.797	80 870	12 934	1.16	93 804	2.67	209 243
0.2	2.397	107 870	24 272	1.225	132 142	2	209 327
0.25	2.997	134 870	38 700	1.287	173 570	1.6	209 378
0.3	3.597	161 870	55 151	1.34	217 021	1.33	209 412



Таблица 3  
Table 3

Затраты энергии на сдвиг грунта краем ножа  
Energy costs for soil displacement by the knife edge

Глубина $a$ , м	Напряже-ние сдвига грунта, МПа	Площадь сдвига грунта краем ножа, мм <sup>2</sup>	Коэффициент микро-сдвигов	Сила, необ-ходимая для сдвига грунта, Н	Путь бульдозера, необходи-мый для разработки одного кубического метра грунта, $s$ , м	Объемные затраты энергии, Дж/м <sup>3</sup>
0.05	0.8	2 882	0.5	3 458	8	26 845
0.1	0.8	6 293	0.5	7 552	4	29 309
0.15	0.8	9 590	0.5	11 508	2.67	29 776
0.2	0.8	12 924	0.5	15 509	2	30 096
0.25	0.8	16 271	0.5	19 525	1.6	30 312
0.3	0.8	19 618	0.5	23 542	1.33	30 456

Таблица 4  
Table 4

Мощность, затрачиваемая на резание грунта ножом бульдозера  
Power used to cut the soil with the bulldozer knife

Глуби-на $a$ , м	Коэффици-ент $k_{сд+}$	Общие затраты энергии на резание одного кубического метра грунта, Дж/м <sup>3</sup>	Время разработки одного кубического метра грунта, с	Мощность, затрачи-ваемая на резание грунта ножом, Вт	Мощность, кВт
0.05	1.1	280 296	8	35 037	35
0.1	1.1	262 778	4	65 694	65.7
0.15	1.1	262 921	2.67	98 595	98.6
0.2	1.1	263 365	2	131 683	131.7
0.25	1.1	263 659	1.6	164 787	164.8
0.3	1.1	263 854	1.33	197 891	197.9

Таблица 5  
Table 5

Силы воздействия лезвия ножа на грунт и сила противодействия массива грунта перемещению лезвия ножа  
Forces of the knife edge impact on the soil and the force of the soil mass counteracting the movement of the knife edge

Глуби-на $a$ , м	Сила $Q_{zpp}$ , Н	Сила тяги, кН	Вертикаль-ная сила, Н	Коэффициент $k_{сд+}$	Сила $Q_{z}$ , Н	Сила тяги, кН	Вертикальная сила, Н
0.05	33 374	31.8	7 908	1.1	36 711	35.0	8 699
0.1	68 731	65	16 187	1.1	75 604	71.5	17 806
0.15	110 470	102	25 509	1.1	121 517	112.4	28 060
0.2	158 739	143	35 660	1.1	174 613	157.4	39 226
0.25	212 142	187	46 848	1.1	233 356	206.1	51 533
0.3	268 816	233	58 316	1.1	295 698	256.7	64 148

Таблица 6  
Table 6

Сила сдвига грунта лезвием ножа и отклонение силы Q от горизонтали  
Force of soil displacement by the knife edge and deviation of force Q from horizontal

Глубина а, м	Плечо силы $F_{сд}$ , мм	Сила $F_{сд}$ , Н	Плечо силы $G_{сд}$ , мм	Сила $G_{сд}$ , Н	Сила $Q_{2зр}$ , Н	Плечо силы $Q_{2зр}$ , мм	Сила тяги, Н	Косинус угла отклонения силы Q от горизонтали	Угол отклонения силы Q от горизонтали
0.05	7.7	3 458	82	113	33 374	3.1	31 832	0.954	10.3
0.1	7.7	7 552	183	247	68 731	6.7	65 011	0.946	9.8
0.15	7.7	11 508	282	376	110 470	13	102 220	0.925	8.1
0.2	7.7	15 509	385	507	158 739	21	143 120	0.902	6.2
0.25	7.7	19 525	482	638	212 142	31	187 340	0.883	4.6
0.3	7.7	23 542	769	769	268 816	42	233 334	0.868	3.4

Для вычисления предела прочности грунта на смятие с учетом напряжений псевдосдвига при другом заглублении ножа бульдозера следует использовать формулу (3).

Зависимости параметров от заглубления ножа даны на рис. 2–9. Результаты аппроксимации представлены на графиках.

Зависимости силы смятия грунта лезвием с учетом его псевдосдвига, силы тяжести грунта,

подверженного смятию, объемному сжатию и псевдосдвигу лезвием ножа, силы сдвига грунта краем лезвия ножа, мощности на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта лезвием ножа, мощности, необходимой для сдвига грунта краем лезвия ножа в начале прохода бульдозера, от заглубления ножа имеют линейный вид. Эти параметры монотонно возрастают по мере заглубления ножа.

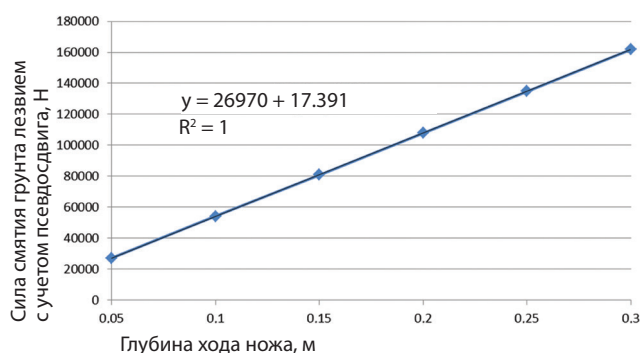


Рис. 2. Зависимость силы смятия грунта лезвием с учетом его псевдосдвига в начале прохода бульдозера от заглубления ножа

Fig. 2. Dependence of soil crumpling force by the knife on the knife depth, taking into account pseudo-displacement of the soil at the beginning of the bulldozer passage

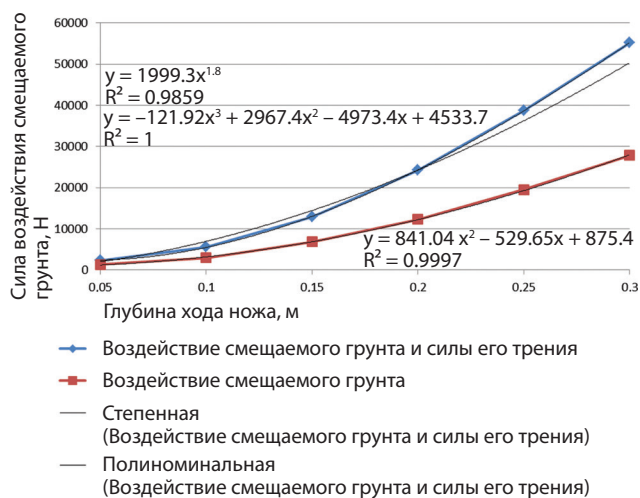


Рис. 3. Зависимость силы воздействия смещаемого грунта на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта лезвием ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа

Fig. 3. Dependence between the knife depth and the force of the displaced soil impact on crumpling, volume compression and pseudo-displacement of the soil by the knife edge at the beginning of the bulldozer passage

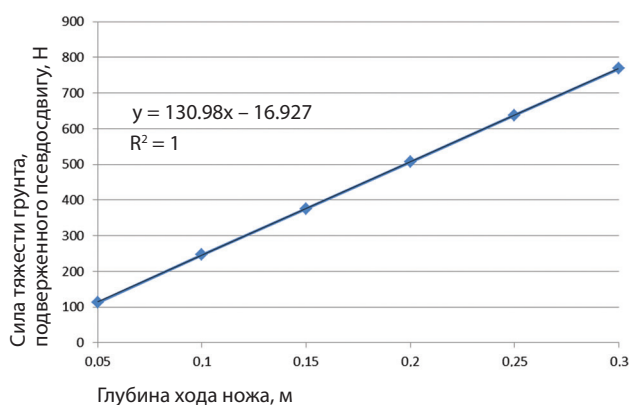


Рис. 4. Зависимость силы тяжести грунта, подверженного смятию, объемному сжатию и псевдосдвигу лезвием ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа

Fig. 4. Dependence between the knife depth and the gravity force of the soil affected by crumpling, volume compression and pseudo-displacement by the knife at the beginning of the bulldozer passage

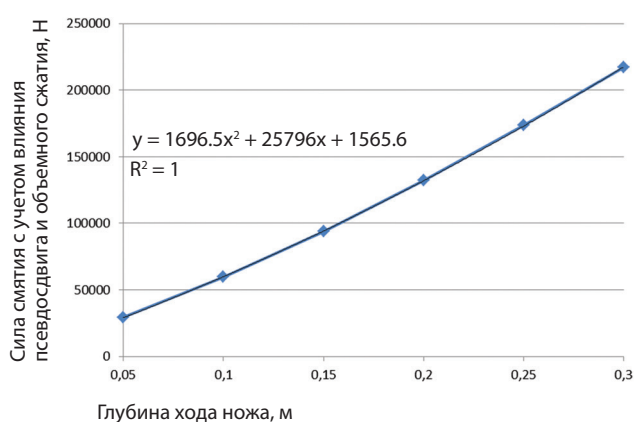


Рис. 5. Зависимость силы смятия с учетом псевдосдвига и объемного сжатия грунта лезвием ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа

Fig. 5. Dependence of soil crumpling force on the knife depth taking into account pseudo-displacement and volume compression of the soil by the knife at the beginning of the bulldozer passage

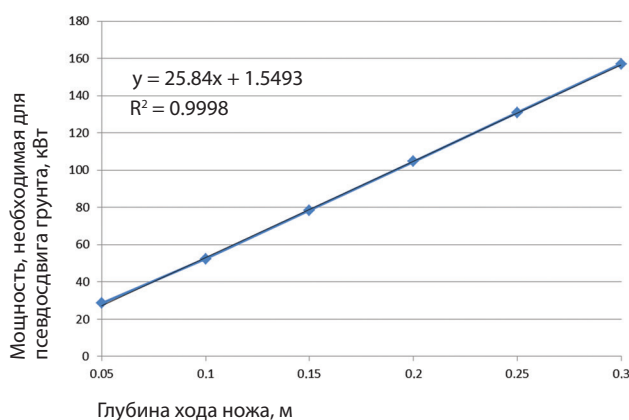


Рис. 6. Зависимость мощности на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта лезвием ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа

Fig. 6. Dependence between the knife depth and power for crumpling, volume compression and pseudo-displacement of soil by the knife at the beginning of the bulldozer passage

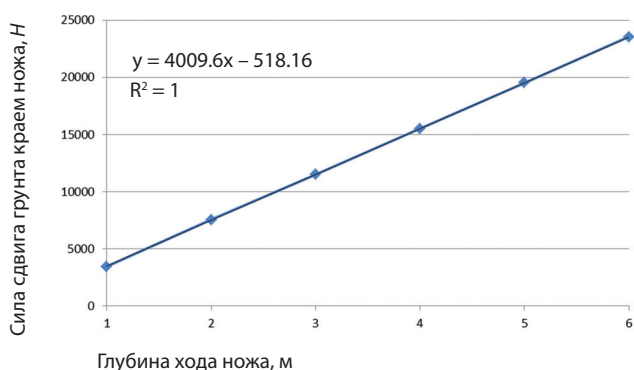


Рис. 7. Зависимость силы сдвига грунта краем лезвия ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа

Fig. 7. Dependence of soil displacement force by the knife edge at the beginning of the bulldozer passage on the knife depth

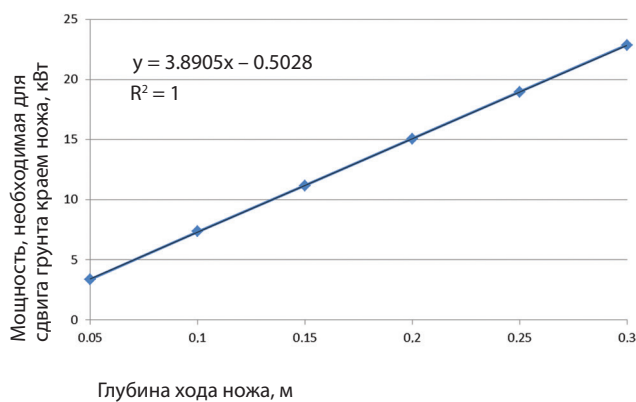


Рис. 8. Зависимость мощности, необходимой для сдвига грунта краем лезвия ножа в начале прохода бульдозера, от заглубления ножа

Fig. 8. Dependence between the power required to displace the soil by the knife edge at the beginning of the bulldozer passage and the knife depth

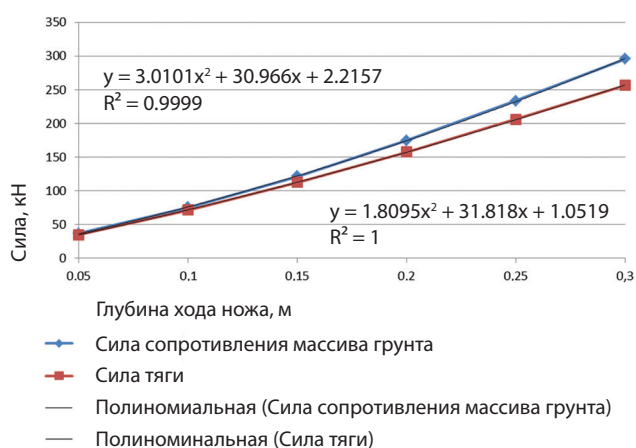


Рис. 9. Зависимость силы тяги и силы сопротивления грунта перемещению лезвия ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа

Fig. 9. Dependence between tractive power and soil resistance to knife edge movement at the beginning of the bulldozer passage and knife depth

Зависимость силы воздействия смещаемого грунта на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта лезвием ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа (рис. 3) имеет более сложный вид. В частности, зависимость воздействия смещаемого грунта и силы его трения можно аппроксимировать с высокой точностью как полиномом третьей степени, так и степенной функцией. Зависимость силы тяги и силы сопротивления грунта перемещению лезвия ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа можно аппроксимировать с высокой точностью полиномом второй степени. Эти параметры также монотонно возрастают по мере заглубления ножа.

### Выводы

1. Зависимости мощности на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта лезвием ножа и мощности, необходимой для сдвига грунта

краем лезвия ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа имеют линейный вид. Мощность, затрачиваемая на перемещение лезвия ножа бульдозера, очень велика, существенно увеличивается по мере заглубления ножа. Зависимости силы тяги и силы сопротивления грунта перемещению лезвия ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа близки к линейным.

2. Средние затраты энергии на резание ножом бульдозера одного кубического метра грунта очень велики:  $u_{\Sigma \text{сд ср}} = 266\,145 \text{ Дж} / \text{м}^3$ . Выявление затрат энергии на перемещение лезвия ножа бульдозера позволит в дальнейшем определить общие затраты энергии с целью модернизации бульдозерного оборудования, направленной на уменьшение этих затрат [15].

Полученные в ходе исследования зависимости необходимы для сопоставления параметров,

полученных из взаимодействия лезвия ножа с грунтом, существующего и усовершенствованного [15] бульдозерного оборудования. Статья обладает научной новизной, так как в литературных источниках полного анализа взаимодействия бульдозерного оборудования с грунтом нет,

встречаются лишь частные попытки. Приведенные результаты могут иметь практическое значение как для анализа работы технических средств, так и для усовершенствования бульдозерного оборудования с целью осуществления рабочего процесса с меньшими затратами энергии.

#### Библиографический список

1. Зыков, Б. И. Теория рабочих процессов строительных машин / Б. И. Зыков. – Ярославль : Издательство ЯГТУ, 2003. – 114 с. – Текст : непосредственный.
2. Карасев, Г. Н. Определение силы резания грунта с учетом упругих деформаций при разрушении / Г. Н. Карасев. – Текст : электронный // Строительные дорожные машины и техника : сайт. – 2010. – 05 января. – URL: <https://sdm.str-t.ru/publics/51/> (дата обращения: 11.10.2023).
3. Кириллов, Ф. Ф. Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многолезвьевых рабочих органов землеройных машин / Ф. Ф. Кириллов. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 11. – С. 44–48.
4. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию / Е. И. Берестов, А. П. Смоляр, А. Х. Афхами Алишах, Э. Х. Джалилванд. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 11. – С. 34–38.
5. Баловнев, В. И. Определение сопротивлений при разработке грунтов рыхлителем по интегральному показателю прочности / В. И. Баловнев, З. Ш. Нгуен. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 2005. – № 3. – С. 38–40.
6. Баловнев, В. И. Исследование управляемых ножевых систем землеройно-транспортных машин / В. И. Баловнев, Р. Г. Данилов, О. Ю. Улитич. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 2017. – № 2. – С. 12–15.
7. Нилов, В. А. Разработка грунта скрепером в условиях свободного резания / В. А. Нилов, Е. В. Федоров. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 2016. – № 2. – С. 7–10.
8. Семкин, Д. С. О влиянии скорости рабочих органов землеройных машин на силу сопротивления грунта резанию / Д. С. Семкин. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2017. – № 1 (53). – С. 37–43.
9. Исследования рабочих органов землеройных машин непрерывного действия : обзор / З. Е. Гарбузов, Г. А. Матушев, Г. Б. Нарет, Л. Н. Смирнов ; Под общ. ред. канд. техн. наук З. Е. Гарбузова. – Москва : [б. и.], 1966. – 89 с.
10. Константинов, Ю. В. Методика расчета сопротивления и момента сопротивления резанию почвы прямым пластинчатым ножом фрезы / Ю. В. Константинов. – DOI 10.31992/0321-4443-2019-5-31-39. – Текст : непосредственный // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 5. – С. 31–39.
11. Пархоменко, Г. Г. Силовой анализ механизмов перемещения рабочих органов почвообрабатывающих машин по заданной траектории / Г. Г. Пархоменко, С. Г. Пархоменко. – Текст : непосредственный // Тракторы и сельхозмашины. – 2018. – № 1. – С. 47–54.
12. Николаев, В. А. Машины для обработки почвы. Теория и расчет / В. А. Николаев. – Ярославль : Ярославская ГСХА, 2014. – 358 с. – ISBN 978-5-98914-132-6. – Текст непосредственный.
13. Николаев, В. А. Резание грунта пассивными рабочими органами. Теория и расчет / В. А. Николаев. – Ярославль : Издательство ЯГТУ, 2022. – 388 с. – Текст непосредственный.
14. Николаев, В. А. Взаимодействие с грунтом ножа и нижней части отвала бульдозера в начале прохода / В. А. Николаев. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-3-330-342. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19, № 3 (85). – С. 330–342.
15. Патент № 2770854 С1 Российская Федерация, МПК E02F 3/76. Оборудование бульдозера : № 2021130731 : заявл. 20.10.2021 : опубл. 22.04.2022 / В. А. Николаев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет» (ФГБОУВО «ЯГТУ»). Текст : непосредственный.

## References

1. Zikov, B. I. (2003). Teoriya rabochikh protsessov stroitel'nykh mashin. Yaroslavl, YSTU Publ., 114 p. (In Russian).
2. Karasev, G. N. (2010). Opredelenie sily rezaniya grunta s uchetom uprugikh deformatsiy pri razrushenii. Available at: <https://sdm.str-t.ru/publics/51/> (accessed 11.10.2023). (In Russian).
3. Kirillov, F. F. (2010). Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo usiliya dlya mnogoreztsovykh rabochikh organov zemleroynykh mashin. Construction and road building machinery, (11), pp. 44-48. (In Russian).
4. Berestov, E. I., Smolyar, A. P., Afkhami Alishakh, A. Kh., & Dzhallilvand, E. Kh. (2010). Vliyanie treniya grunta po poverkhnosti nozha na soprotivlenie rezaniyu. Construction and road building machinery, (11), pp. 34-38. (In Russian).
5. Balovnev, V. I., & Nguen, Z. Sh. (2005). Opredelenie soprotivleniy pri razrabotke gruntov rykhlytelem po integral'nomu pokazatelyu prochnosti. Construction and road building machinery, (3), pp. 38-40. (In Russian).
6. Balovnev, V. I., Danilov, R. G., & Ulitich, O. Yu. (2017). The study of controlled knife systems earth-moving machines. Construction and road building machinery, (2), pp. 12-15. (In Russian).
7. Nilov, V. A., & Fedorov, E. V. (2016). Excavation by scraper in conditions free cutting. Construction and road building machinery, (2), pp. 7-10. (In Russian).
8. Semkin, D. S. (2017). About influence of speed working bodies of digging machines on the resistance force of soil cutting. The Russian automobile and highway industry journal, (1(53)), pp. 37-43. (In Russian).
9. Garbuzov, Z. E., Matushev, G. A., Naret, G. B., & Smirnov, L. N. (1966). Issledovaniya rabochikh organov zemleroynykh mashin nepreryvnogo deystviya : obzor. Moscow, 89 p.
10. Konstantinov, Yu. V. (2019). Methods of calculating the resistance and the moment of resistance to cutting the soil with a straight blade knife cutters. Traktory i sel'khoz mashiny, (5), pp. 31-39. (In Russian). DOI 10.31992/0321-4443-2019-5-31-39.
11. Parkhomenko, G. G., & Parkhomenko, S. G. (2018). Force analysis of the mechanisms of tillage machines working elements following a specified path. Traktory i sel'khoz mashiny, (1), pp. 47-54. (In Russian).
12. Nikolaev, V. A. (2014). Mashiny dlya obrabotki pochvy. Teoriya i raschet. Yaroslavl, Yaroslavskaya GSKhA Publ., 358 p. (In Russian). ISBN 978-5-98914-132-6.
13. Nikolaev, V. A. (2022). Yaroslavskaya GSKhA Rezanie grunta passivnymi rabochimi organami. Teoriya i raschet. Yaroslavl, YSTU Publ., 388 p. (In Russian).
14. Nikolayev, V. A. (2022). Knife and bulldozer bottom blade interaction with soil at the beginning of a pass. The Russian automobile and highway industry journal, 19(3(85)), pp. 330-342. (In Russian). DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-3-330-342.
15. Nikolayev, V. A. Bulldozer equipment. Patent na izobretenie CPC E02F 3/76; E02F 3/7609. No 2021130731. Applied: 20.10.2021. Published: 22.04.2022. (In Russian).

### Сведения об авторе

Николаев Владимир Анатольевич, д-р техн. наук, профессор кафедры строительных и дорожных машин, Ярославский технический университет, e-mail: Nikolaev53@inbox.ru. ORCID 0000-0001-7503-6612

### Information about the author

Vladimir A. Nikolaev, D. Sc. in Engineering, Professor at the Department of Construction and Road Machines, Yaroslavl Technical University, e-mail: Nikolaev53@inbox.ru. ORCID 0000-0001-7503-6612

*Получена 19 сентября 2023 г., одобрена 20 октября 2023 г., принята к публикации 15 декабря 2023 г.  
Received 19 September 2023, Approved 20 October 2023, Accepted for publication 15 December 2023*