

УДК (УДК) 621.878.23-182.38

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОТВАЛА  
БУЛЬДОЗЕРА С ГРУНТОМ

## MATHEMATICAL MODEL OF BLOW INTERACTION BULLDOZER WITH SOIL

Летопольский А.Б., Тетерина И.А.  
Letopolsky A.B., Teterina I.A.Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (Омск, Россия)  
Siberian State Automobile and Highway University (Omsk, Russian Federation)

**Аннотация.** Землеройно-транспортные машины успешно применяются как на объектах, имеющих небольшой объем земляных работ, так и крупных стройках, где они являются основными машинами для разработки и перемещения значительных объемов грунта. Повышение производительности и эффективности бульдозеров может быть достигнуто за счет полного использования их энергетических показателей. В статье представлена разработка комплексной математической модели взаимодействия рабочего органа бульдозера с грунтом. Модель интегрирует статический и динамический (реологический) аспекты этого взаимодействия, что позволяет более точно рассчитывать силы резания, перемещения призмы волочения и силы отпора грунта. Полученные зависимости позволяют наиболее полно описать процесс разработки и транспортировки грунта отвалом бульдозера. Рассмотрены уравнения для определения горизонтальной и вертикальной составляющих сил резания (на основе методики К.А. Артемьева), сил перемещения грунта (с использованием уравнения В.Я. Дворковского) и сил, возникающих при заглублении отвала. Предложено рекуррентное выражение для расчета объема призмы волочения с учетом потерь грунта. Разработанная модель является инструментом для решения задач проектирования гидропривода, системы управления, анализа динамических нагрузок в трансмиссии и моделирования работы бульдозера в различных условиях.

**Ключевые слова:** строительно-дорожная машина, бульдозер, грунт, отвал.

**Дата получения статьи:** 27.11.2025  
**Дата принятия к публикации:** 19.12.2025  
**Дата публикации:** 25.03.2026

**Abstract.** Earthmoving equipment is successfully used both at small-scale excavation sites and at large construction sites. They are the primary machines for excavating and moving significant volumes of soil. Increased productivity and efficiency of bulldozers can be achieved by fully utilizing their energy performance. The article presents the development of a comprehensive mathematical model for the interaction of a bulldozer's working element with soil. The model integrates the static and dynamic (rheological) aspects of this interaction. This allows for more accurate calculations of cutting forces, drag prism displacements, and soil resistance forces. The obtained dependencies allow us to most fully describe the process of soil development and transportation by a bulldozer blade. The equations for determining the horizontal and vertical components of cutting forces (based on the method of K.A. Artemyev), soil movement forces (using the equation of V.Ya. Dvorkovsky) and forces arising during deepening of the dump are considered. A recurrent expression is proposed for calculating the volume of a drag prism taking into account soil losses. The developed model is a tool for solving problems of designing a hydraulic drive, a control system, analyzing dynamic loads in the transmission, and simulating the operation of a bulldozer under various conditions.

**Keywords:** road construction machine, bulldozer, soil, dump.

**Date of manuscript reception:** 27.11.2025  
**Date of acceptance for publication:** 19.12.2025  
**Date of publication:** 25.03.2026

**Сведения об авторах:**

**Тетерина Ирина Алексеевна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»

*e-mail: iateterina@mail.ru*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8012-8511>

**Летопольский Антон Борисович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой "Строительная, подъемно-транспортная и нефтегазовая техника" ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», *e-mail: antooooon-85@mail.ru*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8012-8511>

**Authors' information:**

**Irina A. Teterina** – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)

*e-mail: iateterina@mail.ru*

ORCID: 0000-0001-8012-8511

**Anton B. Letopolsky** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of "Construction, hoisting and transport and oil and gas equipment", Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), *e-mail: antooooon-85@mail.ru*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8012-8511>

## 1. Введение

Бульдозер является очень распространенной специализированной техникой, которая необходима в различных отраслях, если необходимо вести разработку и планировку грунта. Значительное количество научных работ посвящено исследованию геометрии рабочего органа и ее влияние на производительность бульдозера [1-4]. В этих работах анализируется влияние параметров отвала на эффективность разработки и транспортировки грунта. Другие исследователи [5-7] изучают вопрос экономической эффективности применения бульдозера в различных условиях работы и необходимость его правильной эксплуатации при разработке грунта. Отдельное направление исследований посвящено борьбе с налипанием грунта на отвал бульдозера [4, 8]. Авторы предлагают средства для устранения этого негативного явления для повышения производительности машины. Также уделяется внимание моделированию рабочего процесса бульдозера [9]. Авторы разработали программный модуль для интеграции модели бульдозера при разработке выемки земляного полотна. В работах [10, 11] анализируются отечественные модели бульдозеров и получен критерий эффективности для рабочего процесса бульдозера с неповоротным отвалом.

Эффективность и надежность работы землеройно-транспортных машин, в частности бульдозеров, в значительной степени определяются процессами взаимодей-

ствия их рабочего органа с разрабатываемым грунтом. Грунт в процессе копания служит основным источником возмущающих воздействий на трансмиссию, двигатель и систему управления машиной, а также источником усилий, преодолеваемых гидроприводом.

Без глубокого понимания закономерностей этого взаимодействия невозможно корректно рассчитать ключевые параметры гидропривода, подобрать систему управления, изучить режимы работы двигателя и определить динамические нагрузки в элементах трансмиссии. Учет данного взаимодействия является обязательным условием при создании адекватных имитационных моделей бульдозера.

## 2. Постановка задачи

Целью данной работы является синтез полной математической модели системы «Рабочий орган – грунт», объединяющей оба подхода и предоставляющей инструмент для комплексного расчета всех основных сил сопротивления при работе бульдозера.

## 3. Основная часть

Грунт в процессе копания бульдозером является основным источником возмущений, действующих на трансмиссию, двигатель и систему управления машиной, а также основным источником усилий, преодолеваемых гидроприводом [12]. Рассчи-

тать основные параметры гидропривода, подобрать необходимую систему управления, изучить режимы работы двигателя, определить основные динамические нагрузки, действующие в отдельных элементах трансмиссии, невозможно без знания основных закономерностей взаимодействия рабочего органа с разрабатываемым грунтом. Учет этого взаимодействия необходим и при моделировании бульдозера, если моделирование предлагает решение вышеприведенных задач.

В общем случае взаимодействие рабочего органа землеройно-транспортной машины с грунтом можно определить следующей схемой (рис.1), разделенный условно на две модели: статическую с оператором  $R$  и динамическую с оператором  $W(P)$ . В качестве входных возмущений системы служат физико-механические параметры грунта  $y_i$  и  $y_j$ , геометрические характеристики рабочего органа и процесса резания  $Q_k$ , кинематические величины процесса резания  $\varphi_k$ .

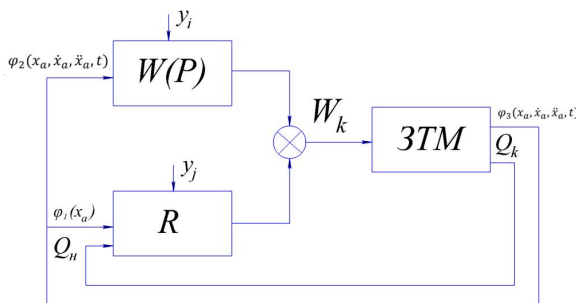


Рис. 1. Схема взаимодействия рабочего органа бульдозера с грунтом

Оператор  $R$  статической модели преобразует геометрические характеристики процесса резания, физико-механические параметры грунта, а также скорость агрегата  $\dot{x}_a$ , в силы резания стружки ножом и перемещения призмы волочения.

Входным воздействием динамической (в механике грунтов – реологической) модели служит функция от перемещения землеройной машины, ее производных и времени, вместе с динамическими характеристиками грунта: коэффициентами динамиче-

ской вязкости и упругости. Данная модель позволяет учитывать как упругие, так и вязко-пластичные свойства грунта и исследовать изменение напряженного состояния грунта в функции времени (рис. 2).

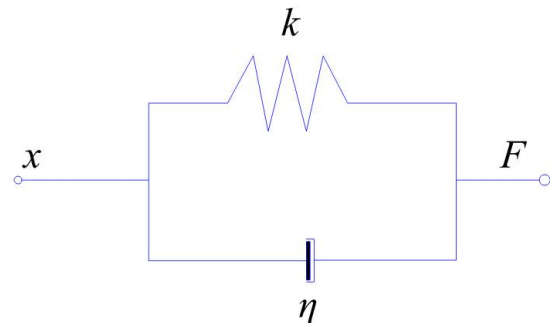


Рис. 2. Реологическая модель Кельвина

Операторы  $R$  и  $W(P)$  динамической системы преобразуют входные возмущения в силы резания  $F$ . Последние действуют на динамическую систему землеройно-транспортная машина, которая вызывает изменение переменных  $\varphi_k$  и  $Q_k$ :

$$F = R[\varphi_1(\dot{x}_a); Q_k; Y_k] + W[\varphi_2(x_a, \dot{x}_a, \ddot{x}_a, t); y_i], \quad (1)$$

где  $x_a$  – путь движения бульдозера;  $\dot{x}_a$ ,  $\ddot{x}_a$  – соответственно скорость агрегата и ускорение;  $t$  – время.

Таким образом, процесс формирования сил резания можно рассматривать как реализацию динамической системы с обратными связями входных возмущений.

Количество и состав входных возмущений  $y_i$  системы «Рабочий орган – грунт» определяется методом отыскания оператора  $R$ .

При использовании методов статики сыпучих сред входными возмущениями являются углы трения, сжимаемость и удельный вес грунта, связь между ними будет определяться по существующим экспериментальным или аналитическим зависимостям механики грунтов.

Количество и состав параметров  $Q_k$  обуславливаются геометрией рабочего органа и условиями резания: угол резания, толщина срезаемой стружки и т.д.

Состав возмущений  $y_i$  зависит в общем случае от вида принятой реологиче-

ской модели грунта и для данного типа грунта не меняется с течением времени.

Показатели физико-механических свойств различных грунтов после разрушения в значительной степени уравниваются. В частности, после превращения грунта в однородную массу грунт теряет способность сцепляться, и возникает возможность рассматривать грунт призмы волочения как среду, близкую к идеальной сыпучей. Поэтому силы сопротивления перемещения призмы следует рассматривать как силы отпора сыпучего тела. Как было показано, наиболее верным аналитическим методом определения этих сил является метод предельного равновесия сыпучей среды. Схема действия сил на рабочий орган бульдозера показана на рис. 3.

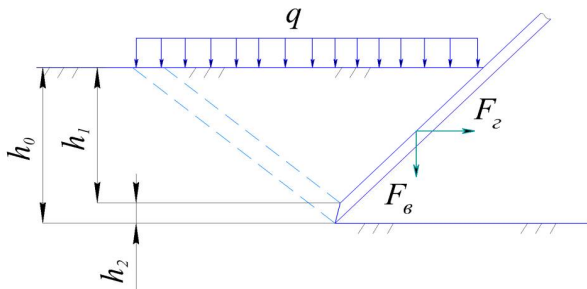


Рис. 3. Схема действия сил на отвал бульдозера

Уравнения, полученные К.А. Артемьевым, должны быть дополнены уравнениями, определяющими силы перемещения призмы грунта и движения стружки отвальной поверхности. Поэтому в полную математическую модель взаимодействия рабочего органа бульдозера с грунтом необходимо включить следующие уравнения:

1. Уравнения К.А. Артемьева для горизонтальной и вертикальной составляющих сил резания с учетом затупления ножа и пригруза от веса призмы грунта:

$$F_r = (1 + \operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{ctg} \alpha) B \left[ k_1 \left( \frac{\gamma}{2} h_1^2 + g_1 h_1 + c_0 h_1 \operatorname{ctg} \rho \right) - c_0 h_1 \operatorname{ctg} \rho \right] + B \left[ k_2 \left( \frac{\gamma}{2} h_2^2 + g_2 h_2 + c_0 h_2 \operatorname{ctg} \rho \right) - c_0 h_2 \operatorname{ctg} \rho \right]; \quad (2)$$

$$F_b = (\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \rho) B \left[ k_1 \left( \frac{\gamma}{2} h_1^2 + g_1 h_1 + c_0 h_1 \operatorname{ctg} \rho \right) - c_0 h_1 \operatorname{ctg} \rho \right] - \operatorname{tg} \delta B \left[ k_2 \left( \frac{\gamma}{2} h_2^2 + g_2 h_2 + c_0 h_2 \operatorname{ctg} \rho \right) - c_0 h_2 \operatorname{ctg} \rho \right]; \quad (3)$$

где  $h_1, h_2$  – соответственно толщина стружки и высота площадки затупления (рис. 3);  $g_1, g_2$  – пригрузки от веса призмы, соответственно на основную грань и грань затупления, зависящие от толщины стружки и параметров грунта;  $k_1, k_2$  – аналитические коэффициенты, зависящие от углов  $\rho, \alpha$ .

2. Уравнение В.Я. Дворковского [13] для сил перемещения призмы грунта и движения стружки по отвальной поверхности с учетом ее изгиба и всестороннего сжатия:

$$F_{\text{ПП}} = V_{\text{ПП}} \cdot \gamma \cdot \operatorname{tg} \rho \left[ 1 + (\operatorname{tg} \delta + \operatorname{tg} \rho) \cdot A \cdot \cos \delta \cdot \sin \theta \right] \cdot e^{(\theta - \alpha) \operatorname{tg} \alpha} \cdot (\sin \alpha + \operatorname{tg} \delta \cdot \cos \alpha), \quad (4)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от свойств грунта и угла резания:

$$A = \sin \frac{\alpha + \rho + \delta}{2} / \cos \frac{\alpha + \rho - \delta}{2}. \quad (5)$$

где  $\theta$  – коэффициент, зависящий от размеров отвала:

$$\theta = \arcsin \left| \cos \alpha - \frac{1}{3} \frac{H}{R} \right|. \quad (6)$$

В настоящее время имеется значительное число выражений, описывающих процесс изменения объема призмы грунта, копаемого бульдозером. Для упрощения расчетов объема призмы предлагается использовать следующее рекуррентное выражение:

$$V_{\text{ПП}}^{i+1} = (B h_{\text{СТР}}^{i+1} l_{i+1} - k_n V_n^i), \quad (7)$$

где  $i = 0, 1, 2, \dots$ ;  $V_{\text{ПП}}^i$  – объем призмы, рассчитанный на  $i$ -ой итерации;  $B$  – ширина рабочего органа;  $h_{\text{СТР}}$  – толщина срезаемой стружки;  $k_n$  – коэффициент потерь грунта, зависящий от вида проводимых работ и свойств грунта;  $l_i$  – путь, пройденный бульдозером на  $i$ -ой итерации.

Коэффициент  $k_n$  зависит от свойств грунта:

для связных грунтов 0,025...0,032;  
для несвязных грунтов 0,06...0,07.

На объем призмы, рассчитанный по формуле (7), должно быть наложено ограничение, связанное с размерами рабочего органа и типом разрабатываемого грунта:

$$V_{ПП}^{i+1} \leq V_{ПП}^{\max} = \frac{B(H-h_{СТР})^2}{2K_{ПП}}, \quad (8)$$

где  $K_{ПП}$  – коэффициент, зависящий от характера грунта.

Величина  $V_{ПП}^o$  может принимать нулевое значение при рассмотрении процесса набора грунта и  $V_{ПП} = V_{ПП}^{\max}$ , когда рассматривается процесс транспортирования.

Кроме сил, возникающих от срезания стружки и перемещения призмы волочения, а рабочий орган бульдозера действует сила, находящаяся в зависимости от интенсивности заглупления отвала в грунт.

Если учесть, что силы отпора грунта имеют то же происхождение, что и реологические силы, так как возникают от снятия грунта нижней кромки отвала, то появляется возможность определить их в функции от модуля упругости грунта.

Представим силу отпора в следующем виде:

$$F_o = \sigma_z \cdot d \cdot B, \quad (9)$$

где  $\delta_z$  – напряжение, действующее на элементарную площадку грунта;  $d$  – ширина площадки, действующего на грунт штампа.

В нашем случае  $d$  представляет собой ширину нижней поверхности отвала, непосредственно соприкасающуюся с грунтом, которая зависит от траектории заглупления рабочего органа к горизонту.

Напряжение  $\delta_z$  можно выразить через коэффициент сжатия и глубину погружения ножа бульдозера:

$$\sigma_z = c_z + Z, \quad (10)$$

где  $c_z$  – коэффициент упругого равномерного сжатия.

Если представить траекторию заглупления состоящей из элементарных ступенек, горизонтальный участок которых пропорционален скорости перемещения машины, а вертикальный участок – скорости перемещения отвала (скорости управления), можно записать соотношение

$$Z = d \frac{v_y}{v_\alpha}. \quad (11)$$

С учетом (10) и (11) выражение для силы отпора грунта будут иметь вид:

$$F_o = c_z d^2 B \frac{v_y}{v_\alpha}. \quad (11)$$

Коэффициент упругого равномерного сжатия определяется по известным формулам для смещений жесткого прямоугольного штампа, расположенного по поверхности упругого пространства:

$$C_z = x_z \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{S}}, \quad (13)$$

где  $x_z$  – коэффициент, зависящий от соотношения сторон штампа;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $S$  – площадь штампа.

Подставляя выражение (13) в формулу (12), учитывая, что  $S = d \cdot B$ , избавляясь от иррациональности в знаменателе выражения (13), получим:

$$F = x_z \frac{E}{1-\mu^2} \sqrt{d^3} B \frac{v_y}{v_\alpha}. \quad (14)$$

Чтобы выражение (14) не теряло физического смысла при изменении скоростей  $v_y$  и  $v_\alpha$ , на величину  $F_o$  должны быть наложены следующие ограничения: при  $v_y < 0$ ,  $F_o = 0$ .

Отрицательные значения  $v_y$  соответствует отрыву рабочего органа от поверхности грунта.

Передаточная функция модели Кельвина при подаче на вход звена перемещения будет иметь вид:

$$W(P) = \frac{F(P)}{X(P)} = R + \zeta P, \quad (15)$$

где  $P = \frac{d}{dx}$  – оператор дифференцирования;  $R$  – коэффициент жесткости грунта;  $\zeta$  – коэффициент вязкости.

Таким образом, в результате анализа и исследований разработана полная математическая модель «Рабочий орган-грунт».

$$F_r = (1 + tg \delta \cdot ctg \alpha) B \left[ k_1 \left( \frac{\gamma}{2} h_1^2 + g_1 h_1 + c_0 h_1 ctg \rho \right) - c_0 h_1 ctg \rho \right] + B \left[ k_2 \left( \frac{\gamma}{2} h_2^2 + g_2 h_2 + c_0 h_2 ctg \rho \right) \right]; \quad (16)$$

$$F_B = (ctg\alpha \cdot tg\rho)B \left[ k_1 \left( \frac{\gamma}{2} h_1^2 + g_1 h_1 + c_0 h_1 ctg\rho \right) - c_0 h_1 ctg\rho \right] - Btg\delta \left[ k_2 \left( \frac{\gamma}{2} h_2^2 + g_2 h_2 + c_0 h_2 ctg\rho \right) \right]; \quad (17)$$

$$F_{ПП} = V_{ПП} \cdot \gamma \cdot tg\rho \left[ 1 + (tg\delta + tg\rho) \cdot \frac{\sin \frac{\alpha + \rho - \delta}{2}}{\cos \frac{\alpha + \rho - \delta}{2}} \cos \delta \sin Q \right] \cdot e^{-(\theta - \alpha)tg\alpha} \cdot (\sin \alpha + tg\delta \cdot \cos \alpha); \quad (18)$$

$$V_{ПП}^{i+1} = (Bh_{СТР}^{i+1} I_{i+1} - k_n V_{ПП}^i); \quad i = 0, 1, 2, \dots;$$

$$F_0 = x_z \frac{E}{1 - \mu^2} \sqrt{x^3 B} \frac{g_y}{g_M};$$

$$F_{TP} \leq F_0 \leq G_{сц} \text{ при } g_y \geq 0;$$

$$F_0 = 0 \text{ при } g_y < 0.$$

## 6. Обсуждение и выводы

1. В результате проведенного анализа и исследований разработана комплексная математическая модель взаимодействия рабочего органа бульдозера с грунтом, которая рассматривает процесс как динамическую систему с обратными связями. Модель интегрирует статический и реологический подходы, что позволяет учесть как мгновенные силовые воздействия, так и их изменение во времени.

2. Предложенная модель включает в себя систему уравнений для расчета:

- горизонтальной и вертикальной составляющих сил резания, основанных на уравнениях К.А. Артемьева с учетом затупления ножа;

- силы перемещения призмы волочения по модифицированной методике В.Я. Дворковского;

- силы отпора грунта при заглублении отвала, выраженной через модуль упругости грунта и кинематические параметры движения машины и рабочего органа;

- объема призмы волочения с использованием рекуррентной формулы, учитывающей потери грунта.

3. Модель является замкнутой: рассчитанные силы воздействуют на динамическую систему «бульдозер», вызывая изменение кинематических параметров и геометрических характеристик резания, которые, в свою очередь, являются входными параметрами для самой модели.

Разработанный математический аппарат предоставляет основу для решения широкого круга практических задач, включая проектирование и оптимизацию систем управления, гидропривода, анализ динамических нагрузок и создание высокоточных имитационных моделей бульдозеров для виртуальных испытаний и прогнозирования их производительности.

## Список литературы

1. Аукунова Б.К., Дудкин М.В., Молдаханов Б.А. Методика расчета бульдозерного отвала с разноуровневой геометрией угла поворота боковых секций // Наука и техника Казахстана. 2025. № 1. С. 7-21. DOI 10.48081/DUKE7639.

2. Мещеряков В.А., Летопольский А.Б., Николаев Д.И., Тетерина И.А. Цифровые технологии автоматизированного сбора экспериментальных данных о рабочем процессе экскаватора // Автоматизация в промышленности. 2023. № 2. С. 30-32. DOI: 10.25728/avtprom.2023.02.05

3. Данильченко С.Г., Петрухин А.В., Титов Д.И., Шамаев Н.А. Расчет основных

## References

1. Aukenova B.K., Dudkin M.V., Moldahanov B.A. Metodika rascheta buldozernogo otvala s raznourovnevoj geometriey ugla povorota bokovyh sekcij. *Nauka i tekhnika Kazahstana*. 2025. No. 1. P. 7-21. DOI 10.48081/DUKE7639. (In Russian)

2. Meshcheryakov V.A., Letopolskij A.B., Nikolaev D.I., Teterina I.A. Cifrovye tekhnologii avtomatizirovannogo sbora eksperimentalnyh dannyh o rabochem processe ekskavatora. *Avtomatizaciya v promyshlennosti*. 2023. No. 2. P. 30-32. DOI: 10.25728/avtprom.2023.02.05. (In Russian)

3. Danilchenko S.G., Petruhin A.V., Titov D.I., Shamaev N.A. Raschet osnovnyh paramet-

параметров отвала бульдозера Т-130 // Сб. науч. статей 3-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых «Наука молодых - будущее России». Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2018. С. 32-34.

4. Teterina I.A., Korchagin P.A., Letopolsky A.B. Investigation of soil destruction by trench chain excavator cutting element process // Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018. Lecture notes in mechanical engineering. 2019. С. 2123-2132. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5\_229

5. Шагиахметова Э.И., Галиев И.Х., Шагиахметова М.И. Техничко-экономические показатели бульдозера с поворотным отвалом // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2024. № 4(9). С. 54-61.

6. Якушев А.Г. Выбор оптимального типа бульдозера в зависимости от условий эксплуатации // Сб. статей Международной научно-практ. конференции «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники». Самара: ООО "ОМЕГА САЙНС". 2018. С. 72-75.

7. Макридина М.Т., Макридин А.А. Тенденции развития при создании и совершенствовании бульдозеров // Сб. докладов Международной научно-практ. конфн. «Наукоемкие технологии и инновации». Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. С. 120-123.

8. Мащенко В.Н. Анализ способов очистки рабочих органов землеройной техники на примере бульдозера // Сб. науч. трудов по итогам международной научно-практической конференции «Приоритетные задачи и стратегии развития технических наук». Тольятти: Федеральный центр науки и образования «Эвенсис», 2016. С. 41-45.

9. Мануковский А.Ю. Ефремов И.В. Моделирование объемов работ при устройстве выемки земляного полотна лесовозной дороги бульдозером // Сб. статей II

rov otvala buldozera T-130. *Sb. nauch. statej 3-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii perspektivnyh razrabotok molodyh uchenyh «Nauka molodyh - budushchee Rossii»*. Kursk, Zakrytoe akcionernoe obshchestvo "Universitetskaya kniga", 2018. P. 32-34. (In Russian)

4. Teterina I.A., Korchagin P.A., Letopolsky A.B. Investigation of soil destruction by trench chain excavator cutting element process. *Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018. Lecture notes in mechanical engineering*. 2019. С. 2123-2132. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5\_229

5. Shagiahmetova E.I., Galiev I.H., Shagiahmetova M.I. Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli buldozera s povorotnym otvalom. *Stroitelnye konstrukcii, zdaniya i sooruzheniya*. 2024. № 4(9). P. 54-61. (In Russian)

6. Yakushev A.G. Vybor optimal'nogo tipa buldozera v zavisimosti ot uslovij ekspluatatsii. *Sb. statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakt. konferencii «Nauchnye issledovaniya vysshej shkoly po prioritetnym napravleniyam nauki i tekhniki»*. Samara, ООО "OMEGA SAJNS". 2018. P. 72-75. (In Russian)

7. Makridina M.T., Makridin A.A. Tendentsii razvitiya pri sozdanii i sovershenstvovanii buldozerov. *Sb. dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakt. konfn. «Naukoeemkie tekhnologii i innovacii»*. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova, 2016. P. 120-123. (In Russian)

8. Mashchenko V.N. Analiz sposobov ochistki rabochih organov zemlerojnoj tekhniki na primere buldozera. *Sb. nauch. trudov po itogam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Prioritetnye zadachi i strategii razvitiya tekhnicheskikh nauk»*. Tolyatti, Federalnyj centr nauki i obrazovaniya «Evensis», 2016. P. 41-45. (In Russian)

9. Manukovskij A.Yu., Efremov I.V. Modelirovanie obemov rabot pri ustrojstve vyemki zemlyanogo polotna lesovoznoj dorogi buldozerom. *Sb. statej II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhn. konf. «Sostoyanie i perspektivy razvitiya lesnogo kompleksa v stranah SNG»* Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet. 2022. S. 67-70. (In Russian)

Международной научно-техн. конф. «Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ» Минск: Белорусский государственный технологический университет. 2022. С. 67-70.

10. Korchagin P.A., Teterina I.A., Letopolsky A.B. Effect of tire dynamic characteristics on vibration load at the operator's workplace // Journal of Physics: Conference Series. 2020. С. 012097. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012097

11. Спирина В.С. Отечественные и зарубежные бульдозеры. Их будущее // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 2-2. С. 98-101.

12. Кашапов Е.А., Игнатов С.Д., Юрина Т.А. Особенности работы гусеничного бульдозера в условиях Арктики // Вестник Сибирского Отделения Академии Военных Наук. 2021. № 63. С. 107-111.

13. Дворковский В.Я. Исследование процесса копания грунтов отвальными рабочими органами, установленными под углом захвата на поперечных откосах: автореф. дисс. ... кандидата техн. наук. Омск, 1973. 24 с.

10. Korchagin P.A., Teterina I.A., Letopolsky A.B. Effect of tire dynamic characteristics on vibration load at the operator's workplace. Journal of Physics: Conference Series. electronic collection. 2020. P. 012097. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012097

11. Spirina V. S. Otechestvennye i zarubezhnye buldozery. Ih budushchee. *Aktualnye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk*. 2016. № 2-2. P. 98-101. (In Russian)

12. Kashapov E.A., Ignatov S.D., Yurina T.A. Osobennosti raboty gusenichnogo buldozera v usloviyah Arktiki. *Vestnik Sibirskogo Otdeleniya Akademii Voennyh Nauk*. 2021. No. 63. P. 107-111. (In Russian)

13. Dvorkovskij V.Ya. Issledovanie processa kopaniya gruntov otvalnymi rabochimi organami, ustanovlennymi pod uglom zahvata na poperechnyh otkosah: avtoref. diss. ... kandidata tekhn. nauk. Omsk, 1973. 24 p. (In Russian)