



GLOBAL JOURNAL OF RESEARCHES IN ENGINEERING: J
GENERAL ENGINEERING
Volume 20 Issue 4 Version 1.0 Year 2020
Type: Double Blind Peer Reviewed International Research Journal
Publisher: Global Journals
Online ISSN: 2249-4596 & Print ISSN: 0975-5861

Digital Twin of the Working Equipment of the Bulldozer

By Leskovets Igor V.

Belarusian-Russian University

Abstract- A brief overview of the types and properties of working equipment of a crawler bulldozer is presented. Methods for determining the forces of resistance to digging the ground with a bulldozer blade are analyzed. Disadvantages of existing methods in determining the values of the forces of resistance to digging, difficulties in calculating their values, which in practice represent an oscillatory process, are noted. A digital model of the working equipment of a bulldozer is proposed, based on the theory of layer-by-layer soil development, which allows calculating the minimum and maximum values of the digging resistance forces depending on the parameters of the soil and the blade when the drawing prism is increased.

Keywords: *bulldozer, working equipment of a bulldozer, dumps, digging of soil, theory of layer-by-layer development of soil, digital twin of the working equipment of a bulldozer.*

GJRE-J Classification: FOR Code: 091599



Strictly as per the compliance and regulations of:



Digital Twin of the Working Equipment of the Bulldozer

Цифровой Двойник Рабочего Оборудования Бульдозера

Leskovets Igor V.

Abstract- A brief overview of the types and properties of working equipment of a crawler bulldozer is presented. Methods for determining the forces of resistance to digging the ground with a bulldozer blade are analyzed. Disadvantages of existing methods in determining the values of the forces of resistance to digging, difficulties in calculating their values, which in practice represent an oscillatory process, are noted. A digital model of the working equipment of a bulldozer is proposed, based on the theory of layer-by-layer soil development, which allows calculating the minimum and maximum values of the digging resistance forces depending on the parameters of the soil and the blade when the drawing prism is increased.

Keywords: bulldozer, working equipment of a bulldozer, dumps, digging of soil, theory of layer-by-layer development of soil, digital twin of the working equipment of a bulldozer.

Аннотация- Представлен краткий обзор типов и свойств рабочего оборудования гусеничного бульдозера. Проанализированы методики определения сил сопротивления копанью грунта отвалом бульдозера. Отмечены недостатки существующих методик в определении величин сил сопротивления копанью, сложности в вычислении их значений, представляющих на практике колебательный процесс. Предложена цифровая модель рабочего оборудования бульдозера, основанная на теории послойной разработки грунта, позволяющая установить минимальные и максимальные значения сил сопротивления копанью в зависимости от параметров грунта и отвала при наборе призмы волочения.

Ключевые слова: бульдозер, рабочее оборудование бульдозера, отвал, копанье грунта, теория послойной разработки грунта, цифровой двойник рабочего оборудования бульдозера.

1. Введение

Бульдозеры нашли широкое применение в области дорожного строительства, добычи рудных и нерудных материалов. Благодаря простоте конструкции бульдозеры являются наиболее широко используются и практически незаменимы в области строительства и содержания дорог. Гусеничные бульдозеры

обладают наилучшей проходимостью и тяговыми характеристиками, по сравнению с колесными. Основным рабочим оборудованием бульдозера является отвал. Отвалы бульдозеров могут иметь разную конструкцию и разную форму[1]. Разработка грунта любым типом отвала бульдозера включает в себя одновременно процесс резания грунта и набора призмы волочения, что в совокупности является копанием. Бульдозеры эксплуатируются в различных климатических и грунтовых условиях. Влияние на технические показатели бульдозеров оказывают температура окружающей среды, влажность грунта, квалификация оператора и условия, существующие на рабочей площадке. Один и тот же бульдозер в разных условиях может показывать разную производительность. Основной задачей эксплуатирующих организаций является стремление к повышению производительности бульдозера и снижение эксплуатационных расходов.

На стадии проектирования рабочего оборудования бульдозеров невозможно учесть все условия возникающие на рабочей площадке. Наиболее совершенное рабочее оборудование бульдозера имеет 3 или даже 4 степени свободы[2]. Это обеспечивается подъемом опусканием рабочего оборудования, поворотом отвала в плане, изменением угла резания, выдвиганием отвала в сторону. Увеличение количества степеней свободы повышает возможности оператора в области управления отвалом, улучшает свойства бульдозера в части обеспечения высокой производительности в различных условиях.

Для получения оперативной информации о конструкции машины или о процессе ее работы все чаще используют цифровые двойники [3]. Если говорить о бульдозере, то информационные технологии и цифровые двойники можно использовать при проектировании, выборе параметров машины ее механизмов и систем[4], а также при эксплуатации для организации наиболее эффективного процесса работы. Работа любого цифрового двойника основана на использовании математических моделей и исходных данных. Математическая модель процесса копания

*Author: Place of work Belarusian-Russian University, Head of the Department Transport and technological machines.
e-mail: leskovets1966@mail.ru*

рабочим оборудованием бульдозера предлагаемая в статье позволяет получить значения сил возникающих в процессе копания их амплитуду и частоту.[5]. Полученные результаты можно использовать при проектировании оптимального рабочего оборудования, для выбора оптимальных параметров отвала бульдозера, а также в процессе эксплуатации машины для выбора наилучшего положения отвала.обеспечивающего минимизацию сил сопротивления копанию.

II. Методика Определения сил Сопротивления Копанию.

Моделированием процесса копания занимались многие ученые. Они предложили различные зависимости для определения силы сопротивления копанию в разных условиях.

Для предварительного определения сил сопротивления копанию[6] часто используется зависимость

$$\sum W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (1)$$

где

W_1 – сила сопротивления резанию грунта;

W_2 – сила сопротивления перемещению призмы волочения;

W_3 – сила сопротивления подъему грунта вверх по отвалу.

Сила сопротивления резанию W_1 определяются по зависимости

$$W_1 = k \cdot b \cdot h \quad (2)$$

где k – удельное сопротивление копанию;

b – ширина стружки;

h – высота стружки.

Сила сопротивления перемещению призмы волочения определяется по формуле

$$W_2 = V \cdot \rho \cdot \mu_1 \cdot g \quad (3)$$

Где

V – объем призмы волочения;

ρ – плотность грунта;

μ_1 – коэффициент трения грунта по грунту;

g – гравитационное ускорение;

Сила сопротивления подъема грунта верх по отвалу определяется по зависимости

$$W_3 = V \cdot \rho \cdot \mu_2 \cdot \cos^2 \delta \quad (4)$$

Где

μ_2 – коэффициент трения грунта по металлу;

δ – угол резания.

Этот способ определения сил сопротивления копанию не позволяет в полной мере исследовать силы, возникающие на рабочем оборудовании бульдозера. Различные методики определения сил сопротивления копанию, предложенные Зелениным А. Н., Ветровым Ю. А., Домбровским Н. Г. и др. учеными предназначены для вычисления сил, возникающих на рабочем оборудовании бульдозера в конце процесса копания при полной призме волочения. Важным недостатком данных методик является невозможность вычисления колебаний сил, возникающих и процессе копания и обусловленных периодическим отделением стружки от массива грунта.

На рис. 1 представлены графики зависимости сил сопротивления копанию во времени, полученные автором при проведении экспериментальных исследований

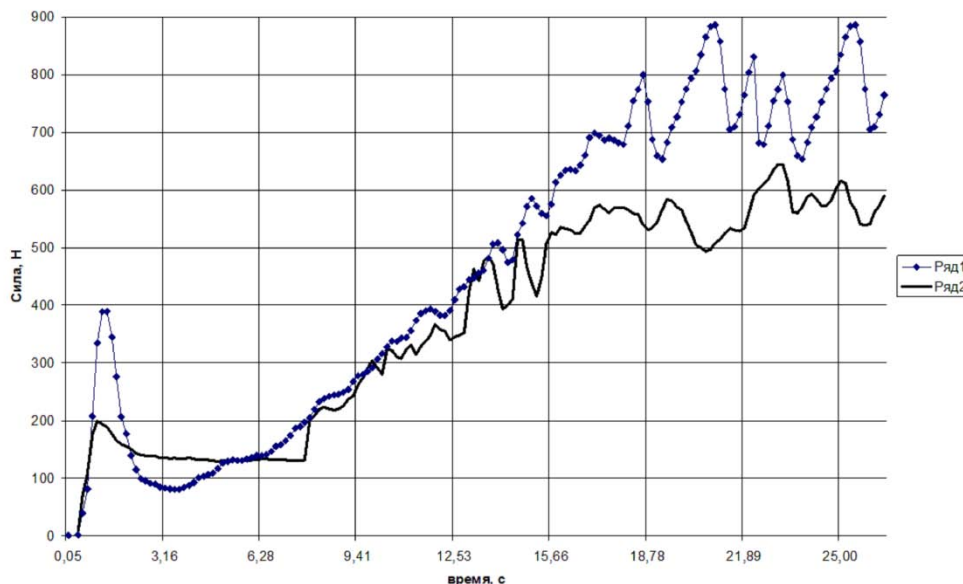


Рис. 1: Силы сопротивления копанию при использовании разных профилей отвала.

Из графиков видно, что колебания сил сопротивления копанью в конце набора призмы волочения могут достигать 20 %.

Для определения колебаний сил сопротивления копанью автором использована и усовершенствована методика Е. И. Берестова, посвященная исследованию процесса послойной разработки грунтов [5].

III. Методика Моделирования Процесса Копания Грунта

Для создания цифровой модели процесса копания [7] Берестовым Е. И. предлагается структура, представленная на рис. 2.

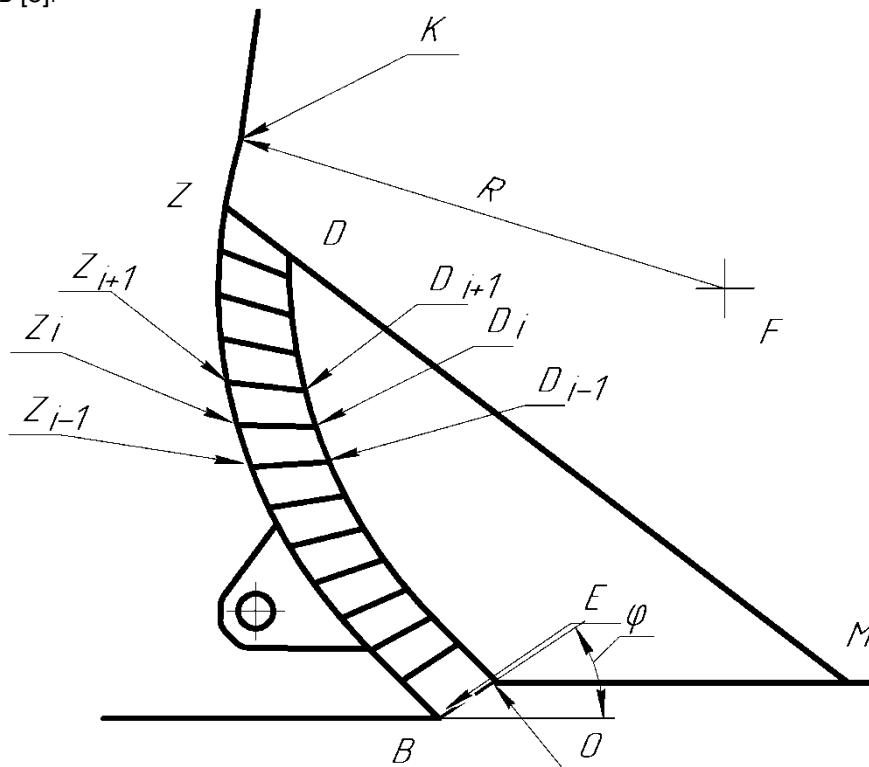


Рис. 2: Отвал с призмой волочения

Профиль отвала ограничен линией BZ. Поверхность грунта расположена на линии MO. Призма волочения ограничена профилем BZDM. Призму волочения предлагается разделить на условно подвижную часть BZDO и условно неподвижную ODM. Условно подвижная часть представляет собой набор сегментов Z_{i-1}, Z_i, Z_{i+1} . Разбивка условно подвижной части на сегменты осуществляется радиусом R, являющимся центром криволинейной части отвала.

При отделении стружки от массива грунта на площадке BO возникает сила E, которая зависит

от параметров грунта, угла наклона φ и давления грунта, расположенного в призме волочения на поверхности OM.

Сила E может принимать максимальное значение, возникающее в момент отделения стружки от массива грунта и минимальное, которое возникает после завершения формирования площадки сдвига.

Максимальное значение силы E определяется по формуле

$$E_{\max} = \frac{G \sin(\alpha + \omega) + R_{OT}^0 \sin(\omega + \rho) - C_{OB} \cos(\alpha + \omega + \varphi) + C_{ПП}^0 + N^0 \cos(\omega)}{\sin(\alpha + \omega + \varphi)} \quad (4)$$

Минимальное значение силы E определяется по формуле

$$E_{\min} = \frac{G \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \omega\right) + R_{OT}^0 \sin(\omega + \rho) + C_{ПП}^0 + N^0 \cos(\omega)}{\sin(\alpha + \omega + \varphi)} \quad (5)$$

где

α – угол резания,

ω – угол трения грунта по отвалу,

R_{OT}^0 – сила трения нулевого сегмента подвижного потока грунта в призме волочения,

ρ – угол внутреннего трения грунта,

C_{OB} – сцепление грунта на площадке сдвига,

φ – угол наклона площадки большого сдвига,

G – вес сегмента подвижного потока в призме волочения.

Сила трения нулевого сегмента подвижного потока грунта в призме волочения:

$$R_{OT}^0 = \frac{R_{ПП} \cdot \sin(\beta_{C_{ПП}}) + (C_{ПП} + N_{i+1}) \sin(\beta_{C_{ПП}})}{\sin(\beta_0 + \omega)} \quad (6)$$

где

$$R_{ПП} = \frac{G \cdot \sin(\rho) + C_{ПП}^X \cdot \sin(\rho) + C_{ПП}^Y \cdot \cos(\rho)}{\cos(\beta_{ПП} - \rho)} \quad (7)$$

24

Проекции силы $C_{ПП}$ на оси абсцисс и ординат

$$C_{ПП}^X = C_{ПП} \cos(\beta_{C_{ПП}}),$$

$$C_{ПП}^Y = C_{ПП} \sin(\beta_{C_{ПП}}),$$

Где

$C_{ПП}$ определяется

$$C_{ПП} = h_{ПП} \cdot C_r \cdot B,$$

где

$h_{ПП}$ – высота выделенного сегмента в подвижном потоке призмы волочения, рис.3.

C_r – удельное остаточное сцепление грунта,

B – ширина отвала.

$\beta_{C_{ПП}}$, β_0 – углы в соответствии с рис.3.

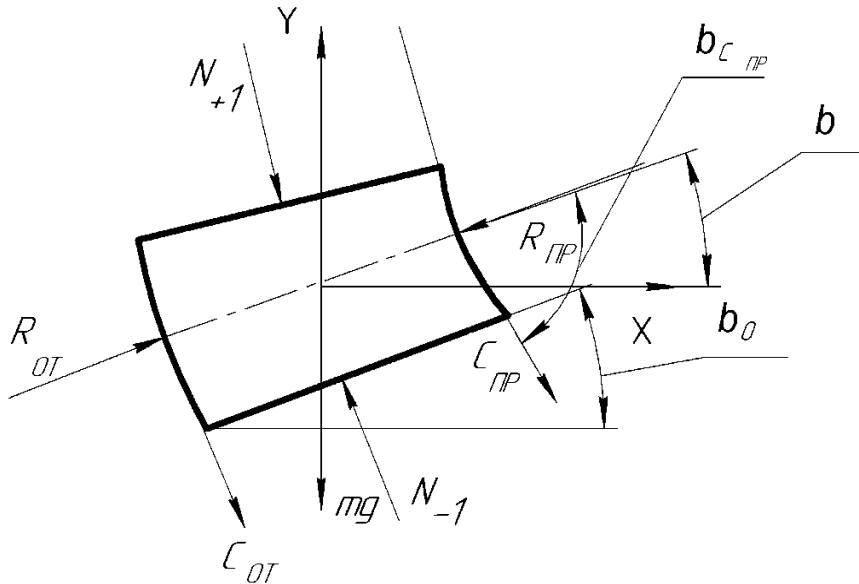


Рис. 3: Элемент подвижного потока

Нормальная сила, действующая от верхнего сегмента грунта, определяется по формуле:

$$N_{-1} = \frac{G \cdot \sin(\beta_{C_{ПП}} + \omega) + R_{ПП} \cdot \sin(\omega + \rho) + (C_{ПП} + N_{+1}^i) \cdot \cos(\omega)}{\cos(\beta_0 - \beta_0^{i-1} + \omega)} \quad (8)$$

где G - вес сегмента грунта, N_{+1}^i - нормальное усилие воздействия от предыдущего сегмента, β_0^{i-1} - угол в соответствии со схемой для предыдущего сегмента. Сила сцепления на площадке OB определяется, как $C_{OB} = l_{OB} \cdot B \cdot C$, здесь l_{OB} - длина площадки OB ,

C_3 - удельное сцепление грунта ненарушенной структуры.

Представленная выше методика позволяет определить силы E на площадке сдвига грунта в момент её формирования. Площадки сдвига возникают периодически, по мере продвижения режущей части отвала, рис. 4.

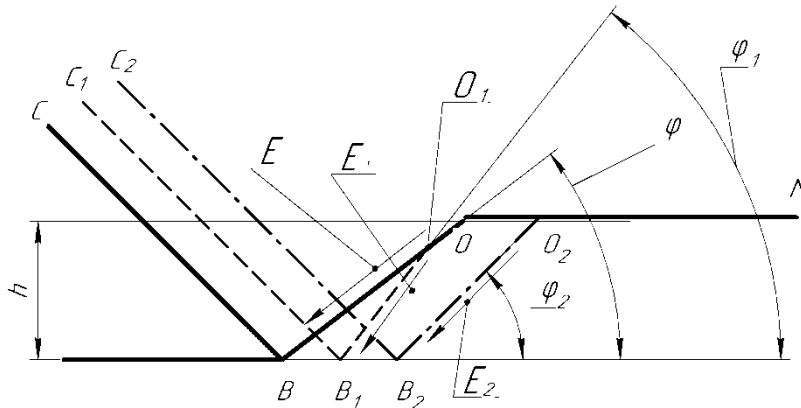


Рис. 4: Последовательность формирования площадок сдвига

Процесс формирования площадок сдвига имеет следующую последовательность:

в положении ножа CB имеется площадка сдвига BO , по мере продвижения ножа к точке B_1 напряжения в грунте растут, растет сила сопротивления передвижению, которая определяется по формуле

$$F_p = \Delta V \cdot C_0 \quad (9)$$

где ΔV - объем грунта перед отвалом на текущем шаге расчета;

C_0 - коэффициент жесткости грунта;

Величина предельных давлений со стороны отвала, которые может выдержать грунт в каждом конкретном случае, зависит от его параметров и определяется по формуле:

$$Q_{пред} = P \frac{\sin(\Delta_1)}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)} \frac{\sin(\Delta + \delta)}{\sin(\Delta)} e^{((2\beta - \pi - \Delta - \delta - \Delta_1 + \rho) \operatorname{tg}(\rho))} \quad (10)$$

где ρ - угол внутреннего трения грунта,

$$\Delta_1 = \arcsin \frac{\sin(\delta_1)}{\sin(\rho)}$$

$$\Delta = \arcsin \frac{\sin(\delta)}{\sin(\rho)}$$

где

δ_1 - угол отклонения приведенного давления со стороны ножа,

δ - угол отклонения приведенного давления со стороны призмы волочения на участок OM ,

β - угол при вершине площадки сдвига.

P - давление, создаваемое призмой волочения на участок OM в зоне формирования площадки сдвига.

Если величина давления со стороны отвала превышает предельные, то формируется площадка сдвига B_1O_1 . На этой площадке сдвига возникает сила E_{max} происходит сдвиг грунта, давление в зоне движения ножа уменьшается, и возникает сила E_{min} . Если точка O_1 не расположена на поверхности OM , то сдвиг считают малым, затем нож продвигается дальше, до формирования нового сдвига. По мере продвижения ножа, периодически возникают малые

сдвиги, до выхода точки O_i на площадку OM , тогда сдвиг считают большим, что соответствует линии O_2B_2 , после чего картина повторяется.

Таким образом, на основании предложенной методики последовательно, с заданным шагом определяются силы, возникающие на ноже отвала бульдозера в процессе копания грунта, рис. 5.

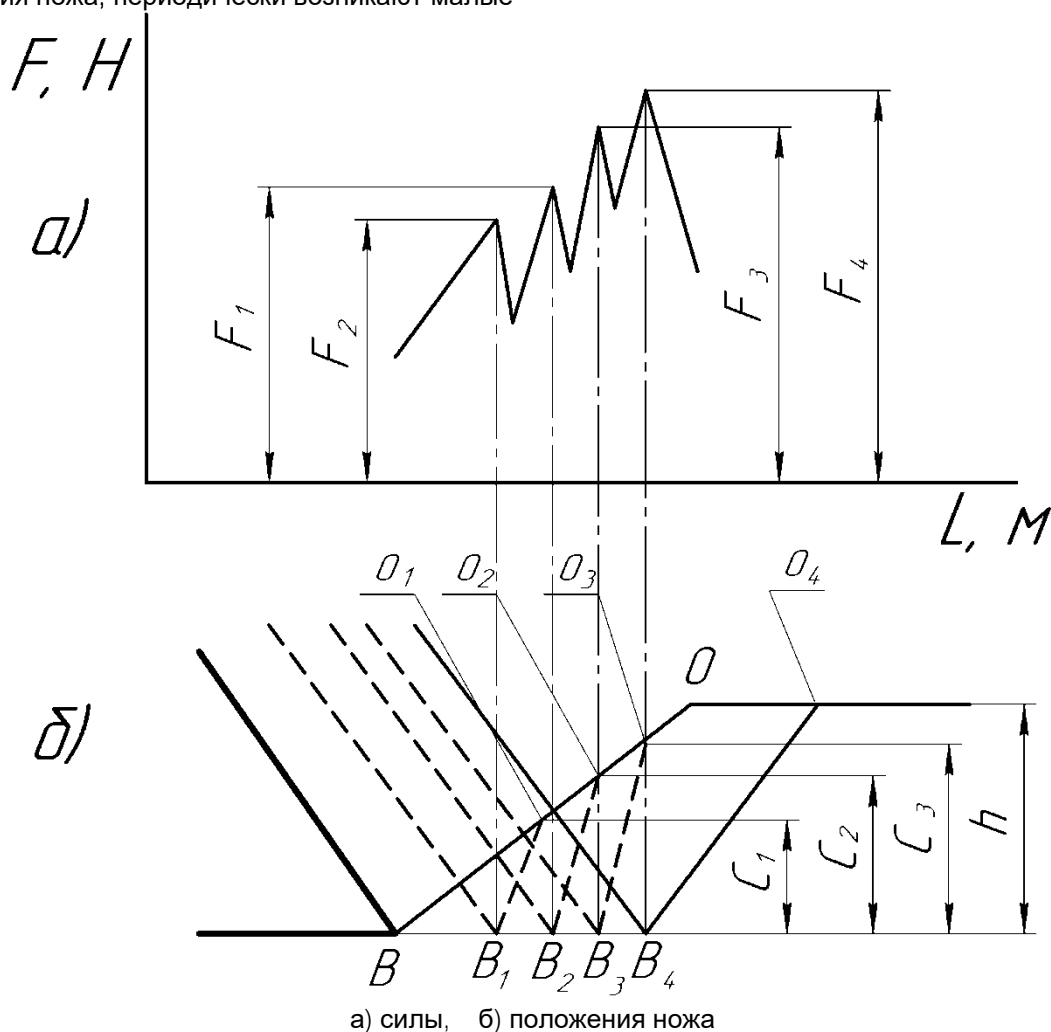


Рис. 5: Силы, возникающие на отвале ножа бульдозера в процессе копания

По мере продвижения отвала бульдозера, на нем формируется призма волочения. Величина её зависит от пройденного пути и увеличивается на каждом шаге. Объем, на который увеличивается призма волочения определяется по формуле

$$\Delta V_n = b \cdot \Delta l \quad (11)$$

где Δl - приращение пути, пройденного бульдозером, за текущий шаг расчета.

Зная новую величину объема призмы волочения можно построить её профиль, на основании параметров кривизны отвала и угла естественного откоса грунта. Параметры профиля

призмы волочения позволяют определить новое положение точки M на каждом шаге и новую массу грунта, оказывающую давление на площадку OM . Соответственно можно смоделировать картину увеличения сил сопротивления копанию по мере роста призмы волочения.

Цифровой двойник реализован в виде программного обеспечения, которое позволяет в режиме реального времени определить силы сопротивления копанию в зависимости от параметров грунта, геометрических параметров отвала и действий оператора.

Параметры грунта представлены в таблице 1.

Таблица 1: Параметры грунтов различных категорий

Параметры грунта	Категория грунта		
	I-II	III	III-IV
угол внутреннего трения грунта (град)	26-32	24-28	20-25
угол трения грунта по металлу (град)	26-32	22-26	22-26
угол наклона призмы волочения к горизонту (град)	35-55	35-55	35-55
удельное сцепление грунта ненарушенной структуры (кПа)	4-20	30-70	50-120
удельное сцепление грунта нарушенной структуры (в призме волочения) (кПа)	0-2	3-5	4-8
удельная жесткость Н/м	1000-2000	1500-3000	2000-3500
Удельное сопротивление резанию, Па	12	26	35
Плотность, т/м.куб	1,2	1,3	1,4

На рис. 6 представлены графики разработки грунтов 1, 2 и 3 категорий с результатов расчета сил, возникающих при параметрами, указанными в таблице 1.

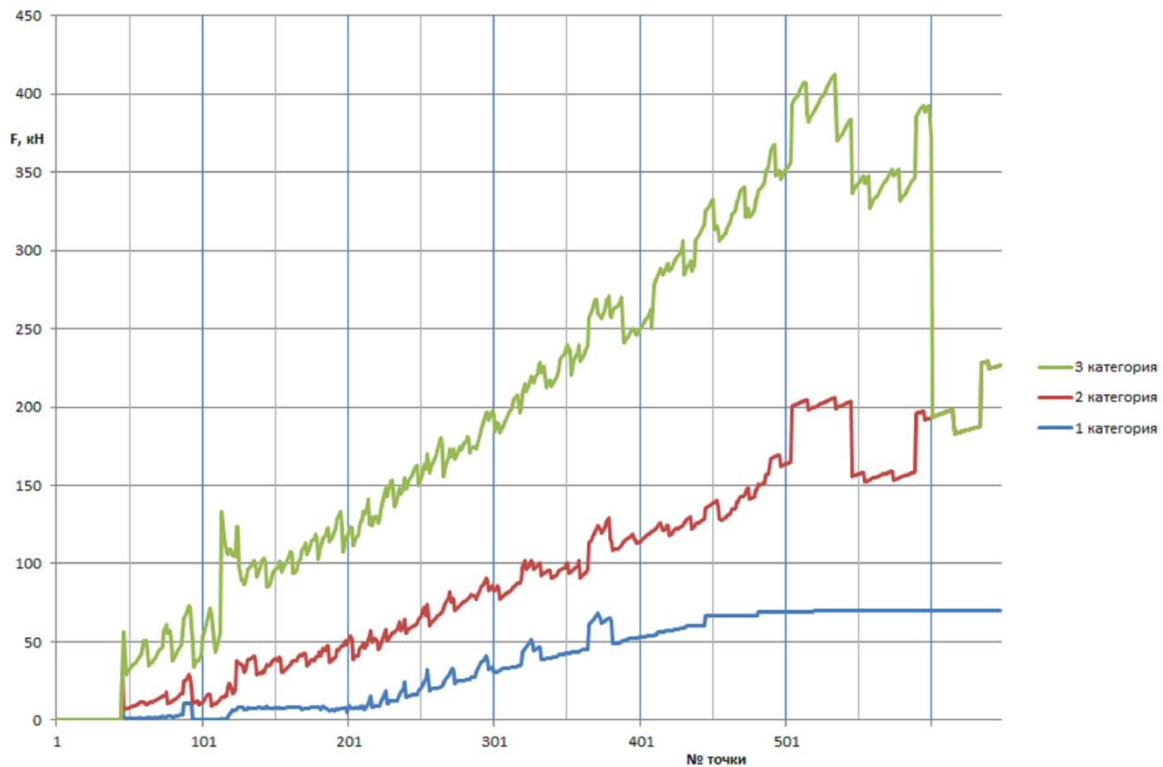


Рис. 6: Силы, возникающие при разработке грунтов 1, 2 и 3 категорий.

Из рис. 7 видно, что параметры грунта оказывают значительное влияние не только на величину силы сопротивления копанью, но и на периодичность их колебаний.

Значительное влияние на форму и периодичность колебаний сил сопротивления копанью оказывают параметры рабочего оборудования и высота призмы волочения. На стадии проектирования цифровой двойник можно использовать для выбора оптимальных параметров отвала. В настоящее время значения

этих параметров выбираются на основании результатов экспериментальных исследований проведенных ранее. Кроме формы и размеров ножа и отвала в процессе эксплуатации можно изменять положение угла его установки, что также приводит к изменению сил сопротивления копанью. Положение отвала оказывает влияние на величину призмы волочения, что в свою очередь может увеличить или уменьшить производительность бульдозера.

При автоматизации управления положением рабочим оборудованием бульдозера основной задачей цифрового двойника является выбор такого положения рабочего оборудования, при котором обеспечивается максимальная производительность, минимальные значения сил сопротивления компанию и поддержание такой толщины стружки, которая будет восполнять грунта формирующие боковые валики. Такая задача является достаточно сложной при отсутствии данных о параметрах грунта. В условиях рабочей площадки, как правило, параметры грунта известны, хотя и в значительной степени зависит от температуры окружающей среды. В начале рабочей смены эти параметры могут быть измерены и введены в систему управления рабочим оборудованием бульдозера в качестве исходных значений для работы цифрового двойника. Важной задачей является разработка источников первичной информации и алгоритмов работы системы автоматизированного управления рабочим оборудованием бульдозера, позволяющих достичь поставленных целей.

Библиография

1. Bulldozer – Construction Equipment // <https://www.engineeringcivil.com>. Режим доступа <https://www.engineeringcivil.com/bulldozer-construction-equipment.html>. Дата доступа 06.07.2020.
2. CrawlerDozers. <https://www.constructionequipment.com> Режим доступа <https://www.constructionequipment.com/crawler-dozers>. Дата доступа 06.07.2020.
3. Digitaltwin. <https://en.wikipedia.org>. Режим доступа https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_twin. Дата доступа 07.06.2020.
4. Leskovets, I. V. Applying information technologies to a bulldozer design / I V Leskovets Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 760, International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019) 12–15 November 2019, Moscow, Russian Federation.
5. Berestov E I Nauchny`e osnovy` vzaimodejstviya rabocheho oborudovaniya zemlerojno-transportny`x mashin s gruntom Mogilev: Belarus.-Ros. un-t, 2017. – 1999 s.
6. Довгяло В.А., Бочкарев Д.И. Дорожно-строительные машины. Часть I: Машины для земляных работ. Гомель : БелГУТ, 2010. – 250 с.
7. Берестов, Е.И. Методика определения параметров больших и малых сдвигов при копании грунта отвальным рабочим органом / Е. И. Берестов, И. В. Лесковец // Строительная наука и техника. – 2009. – №1. – С. 86–91.