

УДК 621.87:658.512.011.56

*И. В. Лесковец, Е. И. Берестов, А. П. Смоляр*

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЯ ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА НА ВЕЛИЧИНЫ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОПАНИЮ

UDC 621.87:658.512.011.56

*I. V. Leskovets, Y. I. Berestov, A. P. Smolyar*

## IMPACT OF PARAMETERS OF THE BULLDOZER BLADE PROFILE ON THE MAGNITUDES OF DIGGING RESISTANCE

### **Аннотация**

Отмечается, что существующая методика определения сил сопротивления копанию отвалом бульдозера не позволяет учитывать влияние параметров профиля отвала на величины этих сил. Обозначено, что современные научные исследования дают возможность теоретическим путем установить степень влияния на величины сил сопротивления копанию параметров профиля отвала. Представлена установка, способствующая проведению экспериментов для определения сил сопротивления копанию отвалом бульдозера, описана методика и приведены результаты экспериментов.

### **Ключевые слова:**

бульдозер, рабочее оборудование, отвал, силы сопротивления копанию, экспериментальные исследования.

### **Abstract**

The paper states that current techniques for determining resistance forces when digging with a bulldozer blade do not take into account the effect of parameters of a blade profile on the magnitudes of these forces. It is noted that modern scientific studies allow establishing theoretically the degree of impact of blade profile parameters on values of digging resistance forces. The installation is presented for carrying out experiments, which determine resistance forces to digging with a bulldozer blade, and methods of doing experiments and their results are described.

### **Key words:**

bulldozer, operating equipment, blade, digging resistance forces, experimental research.

### **Введение**

В области проектирования машин для земляных работ в настоящее время сложились представления о том, что в процессе разработки грунта преодолевается комплексное сопротивление, называемое сопротивлением копанию. Вскрыты закономерности в определении сопротивлений копанию [1–3] как суммы составляющих трех основных частей: сопротивление грунта резанию; сопротивление перемещению призмы волочения; сопротивление заполнению

ковша (у ковшовых машин) либо сопротивление перемещению стружки вверх по отвалу или сквозь призму волочения (для машин с отвальным рабочим органом). Хотя эта методика учеными подвергалась критике, однако и в настоящее время она используется для практических расчетов.

Многими исследователями, в частности Н. Г. Домбровским [4], Ю. А. Ветровым [5], установлено, что сила сопротивления резанию является наиболее весомой составляющей и ко-

леблется от 42 до 83 % в сумме сопротивлений копанию при применении различных рабочих органов в разных условиях. На основании экспериментальных данных рекомендуется устанавливать значения сил сопротивления резанию и сопротивления копанию, предлагается использование расчетных зависимостей с учетом коэффициента, характеризующего удельное сопротивление копанию. Отмечается важность *уточнения определения величин и закономерностей сил сопротивления резанию и копанию, что должно в наибольшей степени способствовать усовершенствованию и повышению эффективности землеройных машин.*

Ряд исследований, проведенных современными учеными [6, 7], посвященных определению величин сил сопротивления копанию грунта, позволяет установить степень влияния параметров профиля отвала на эти силы и разработать специализированное программное обеспечение.

В статье обозначены цели и задачи исследования, представлена экспериментальная установка, изложена методика исследований, определено необходимое число опытов. Приведено описание проведения экспериментальных и теоретических исследований, выполнен их анализ.

### ***Цели и задачи исследования***

Целью экспериментальных исследований является получение численных значений сил сопротивления копанию, сопоставление их с теоретическими; определение влияния параметров отвала на величины сил сопротивления копанию на разных стадиях копания.

Задачи экспериментальных исследований:

– получение численных значений горизонтальной составляющей сопротивления копанию, а также интенсивности нарастания сил по мере роста при-

мы волочения для отвалов с разными параметрами;

– сопоставление полученных экспериментальных результатов с теоретическими;

– оценка адекватности теоретических исследований.

### ***Установка для экспериментальных исследований***

Эксперименты проводились в грунтовом канале Белорусско-Российского университета. Экспериментальная установка состоит из следующих основных частей: грунтового канала, тележки с рабочим органом, тяговой станции, тензоизмерительного комплекта.

Грунтовой канал представляет собой емкость прямоугольного сечения высотой 1,2 м, шириной 1 м и длиной 8 м, заполненную песком. В верхней части канала имеются направляющие для установки тензометрической тележки.

Привод тележки осуществляется от электрического двигателя через редуктор с переменными передаточными числами посредством канатной тяги. Скорость передвижения тележки изменяется переключением редуктора.

Для устранения возможных перекосов при неравномерно распределенной нагрузке тележка приводится в движение через две ветви каната, прикрепленные симметрично относительно ее продольной оси. Рабочее движение тележки производится следующим образом: при включении двигателя 6 через редуктор 7 в движение приводится барабан 2 (рис. 1). При вращении барабана 2 на него навивается ветвь 3 и сбегает ветвь каната 5. Реверс осуществляется посредством смены направления вращения ротора двигателя. При этом барабан вращается в противоположную сторону, и теперь на него набегает ветвь каната 5 и сбегает ветвь каната 3. Тензометрическая тележка будет двигаться в противоположную сторону.

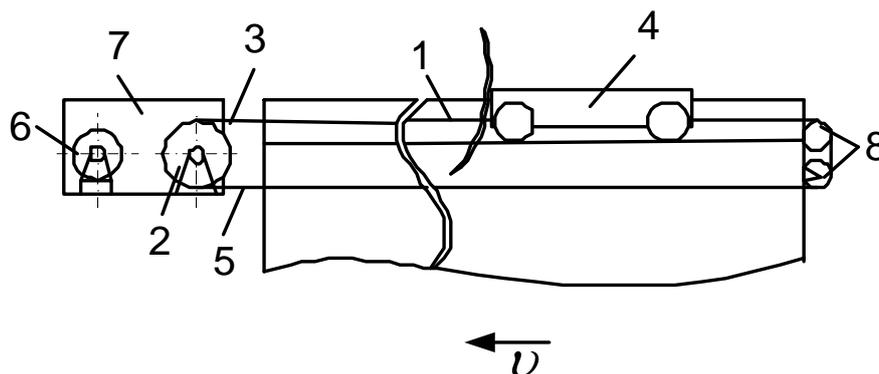


Рис. 1. Схема запасовки канатов: 1 – канат; 2 – барабан; 3 – ветвь набегающая; 4 – тележка; 5 – ветвь сбегаящая; 6 – двигатель; 7 – коробка передач автомобильная; 8 – блоки неподвижные;  $v$  – направление рабочего движения

Главным элементом установки является тензометрическая тележка, общий вид которой представлен на рис. 2. Составляет тележка из двух основных частей – внутренней тензометрической 2 и внешней 1 рам. Для измерения горизонтальной составляющей сопротивления копания используется свободная под-

веска тензометрической рамы 2 с внешней рамой 1. Усилия определяются в связях, накладываемых на раму, тензометрическим датчиком (не показан) и тензометрическим преобразователем 3. В местах связей трение сведено к минимуму за счет применения подшипников качения.

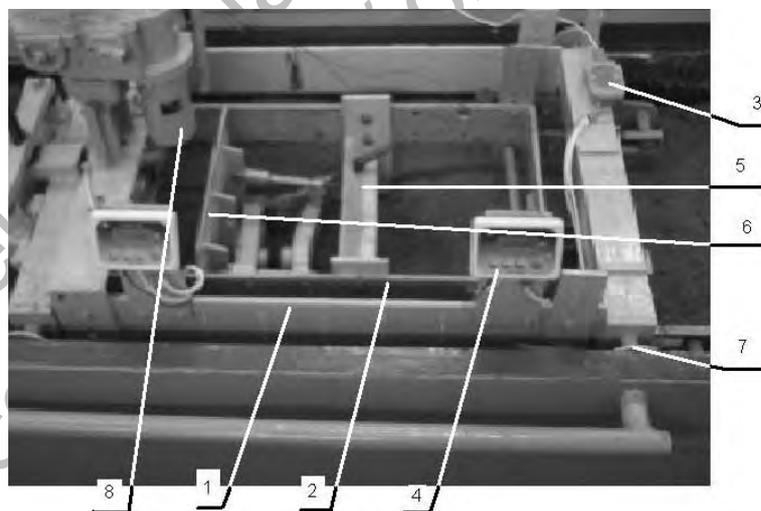


Рис. 2. Общий вид тензометрической тележки: 1 – внешняя рама; 2 – внутренняя рама; 3 – тензопреобразователь; 4 – табло регистрации усилий; 5 – универсальная рама; 6 – отвал; 7 – опорные ролики; 8 – редуктор

Внешняя рама 1 установлена на опорных роликах 7 и подсоединена к тяговой станции. На этой раме размещена универсальная рама 5, к которой прикреплен отвал 6. Для возможности

регулирования толщины стружки на раме 1 дополнительно установлен редуктор 8, кинематически связанный с внутренней рамой 2. Привод редуктора осуществляется шкивом.

На рис. 3 изображена схема профиля отвала с параметрами, оказывающими влияние на силы сопротивления копанью.

параметров профиля отвала для бульдозера «БЕЛАРУС-1502» и рекомендованные в результате проведения теоретических расчетов.

В табл. 1 представлены значения

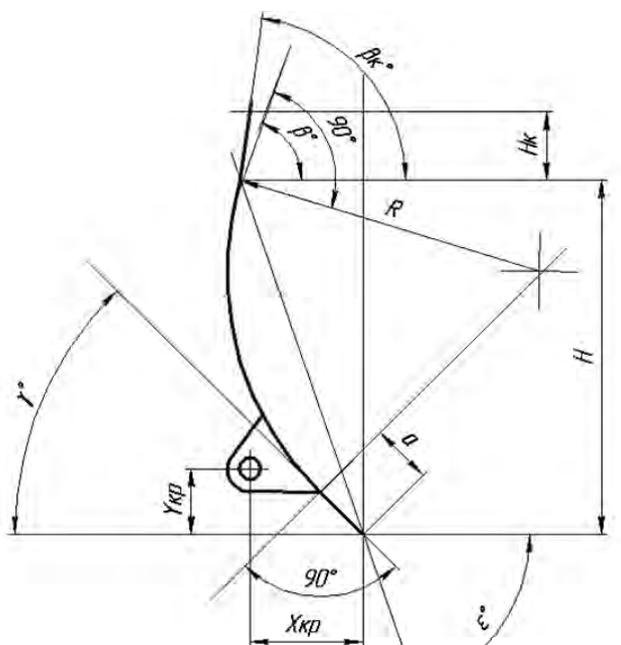


Рис. 3. Параметры профиля отвала

Табл. 1. Параметры профилей отвалов

Наименование параметра	Единица измерения	«БЕЛАРУС-1502»	Рекомендуемый параметр
Высота отвала Н	м	1,028	1,028
Высота козырька Н <sub>к</sub>	м	0,205	0,205
Точка крепления Х <sub>кр</sub>	м	0,446	0,446
Точка крепления У <sub>кр</sub>	м	0,254	0,254
Длина прямолинейной части отвала а	м	0,323	0,200
Ширина отвала В	м	3,630	3,630
Радиус кривизны отвала м	м	0,783	1,2
β	град	69,8	69,8
β <sub>к</sub>	град	95	95
ε	град	71,3	71
γ	град	50	53

Для экспериментальных исследований изготовлены модели отвалов с

параметрами, применяемыми на практике и рекомендованными на основе

теоретических исследований. Модели отвалов продемонстрированы на рис. 4. Масштабный коэффициент для физических моделей равен 1:7.

Рабочий орган позволяет изменять толщину стружки путем вращения шкива редуктора 8 (см. рис. 2).

Запись результатов измерения осуществляется следующим образом. Сигналы с тензодатчика передаются на тензометрический преобразователь 3 (см. рис. 2) и далее через разъем RS 232

порта на персональный компьютер, на котором установлена программа обработки поступающих цифровых сигналов (рис. 5). Программа обеспечивает конвертацию цифрового сигнала в файл формата MS Excel с записью числовых значений времени и усилия на датчике в момент его опроса. Таким образом, имеется возможность сохранения на диске компьютера файлов со значениями времени и горизонтальной составляющей процесса копания грунта.

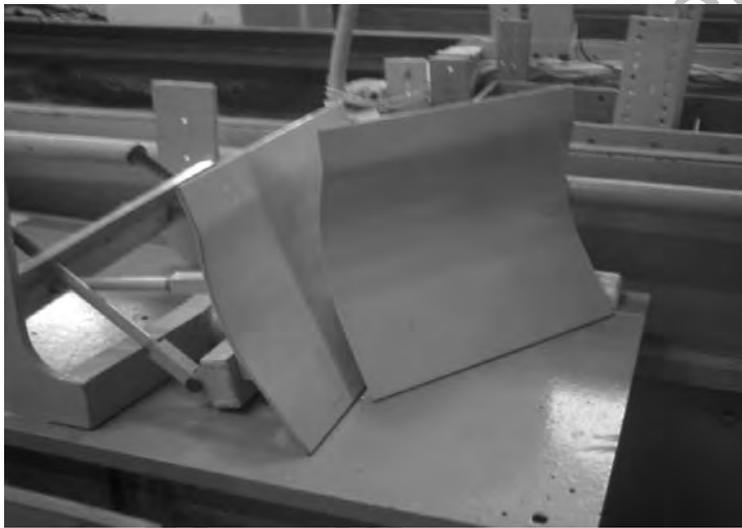


Рис. 4. Модели отвалов с универсальной рамой



Рис. 5. Тензометрическая тележка с компьютером

### Методика проведения лабораторных исследований

При лабораторных исследованиях с целью сокращения времени подготовки опытов и обеспечения по возможности идентичных условий при их повторении применялась методика физического моделирования, разработанная В. И. Баловневым [8, 9].

Для сопоставления экспериментальных результатов с теоретическими, полученными с помощью программного обеспечения, использовались реальные физико-механические свойства грунта в канале и реальные размеры исследуемой модели.

Основой для получения модели грунта служил мелкозернистый речной песок, размер фракций которого не превышал 2 мм. Предварительно увлажненный песок перекапывался и уплотнялся с помощью электрической виброплощадки. В качестве показателя, определяющего подобие грунта по прочности, использовалось число ударов ударника ДорНИИ. Параметры ударника были изменены в соответствии с рекомендациями, изложенными в [10, 8]. Масштабный коэффициент  $k = 7$ . Модель грунта приготавливалась на 6 ударов, что соответствует II категории грунта.

Опыты проводились в следующем порядке. Перед уплотнением грунта выглаживалась горизонтальная площадка с уровнем, соответствующим началу копания. Исследуемый отвал устанавливался в тензометрическую тележку. Производилось заглубление отвала на

фиксированную величину. Далее включалась измерительная аппаратура и осуществлялся процесс копания грунта, результаты которого фиксировались оборудованием.

Перед проведением эксперимента с помощью сдвигового прибора измерялись сцепление и угол внутреннего трения, характеризующие свойства исследуемой категории грунта. Дополнительно измерялись угол внешнего трения, плотность грунта ненарушенной структуры, плотность разрыхленного грунта [11]. Результаты этих измерений представлены в табл. 2.

С целью исключения влияния систематических погрешностей, неконтролируемым образом изменяющихся во времени, а также для исключения влияния параметров, изменяющихся неконтролируемым образом в пространстве, например, неоднородность грунта при некачественном уплотнении, во время эксперимента проводилась рандомизация опытов.

При последующей обработке результатов определялись максимальные и средние значения горизонтальной составляющей сопротивления копанию и соответствующие значения удельного сопротивления резанию.

На рис. 6 представлена совмещенная осциллограмма для режимов копания моделями отвала «БЕЛАРУС-1502» и отвала с рекомендуемыми параметрами с толщиной стружки 2 см в процессе набора полной призмы волочения.

Табл. 2. Физико-механические свойства грунта

Наименование показателя	Категория грунта
	II
Число ударов плотномера	6
Сцепление грунта $c$ , кПа	4
Остаточное сцепление грунта $c_p$ , кПа	0,45
Угол внутреннего (грунта по грунту) трения $\rho$ , град	28
Угол внешнего (грунта по металлу) трения $\omega$ , град	25
Плотность грунта на ноже $\rho_r$ , т/м <sup>3</sup>	1,7

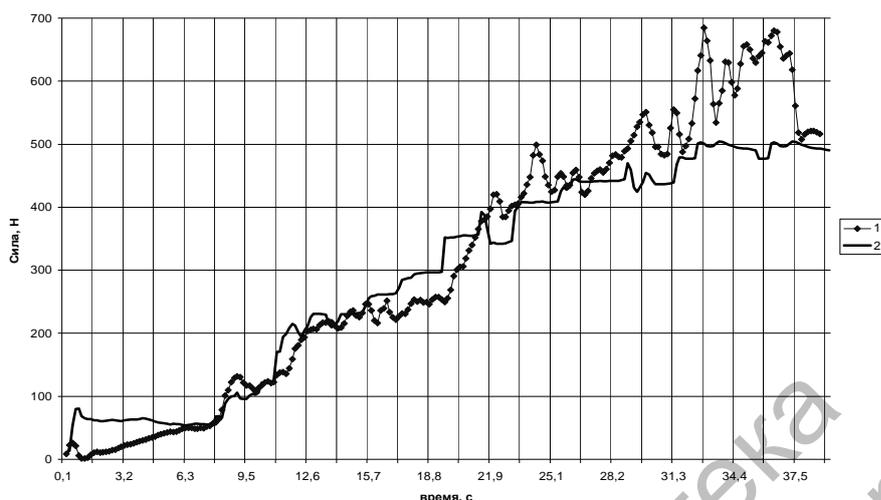


Рис. 6. Оциллограмма сил сопротивления копанию при толщине стружки 2 см: 1 – модель отвала «БЕЛАРУС-1502»; 2 – модель отвала с рекомендуемыми параметрами

Процесс набора призмы волочения занимает обоими отвалами примерно одинаковое время: около 6 с. В дальнейшем на протяжении набора призмы волочения практически до козырька отвала рост сил сопротивления копанию на двух отвалах почти одинаков. На завершающей стадии набора призмы волочения силы сопротивления копанию на отвале с рекомендуемыми параметрами изменяются с меньшими величинами, чем на отвале «БЕЛАРУС-1502». Аналогичные результаты получены во время проведения теоретических исследований.

#### **Методика определения необходимого числа опытов**

Необходимое число опытов устанавливалось статистическим путем исходя из величины характерного для данного метода испытаний коэффициента вариации  $K_{\text{вар}}$  и требуемой степени точности результата  $K_{\text{доп}}$ . Основываясь на многочисленных экспериментах по определению механических свойств грунтов, проведенных в Институте горного дела [12, 13], принимаем рекомен-

дуемое значение  $K_{\text{доп}} = 12\%$ .

Копание грунта представляет собой процесс периодического отделения стружки грунта с параллельным набором призмы волочения, сопровождающийся соответствующим изменением сил, что видно из оциллограмм, приведенных на рис. 6...8. При фиксации экстремальных значений сил необходимо знать их минимальное количество, обеспечивающее принятую точность измерений. Для получения единого диапазона фиксации результатов измерений принята длина пути, которая обеспечивает набор полной призмы волочения для всех опытов с одинаковой толщиной стружки. Поскольку при проведении эксперимента количество колебаний сил трудно фиксировать, то определялись количество колебаний в процессе набора грунта, отклонение значений последующего максимума от предыдущего для того, чтобы получившаяся выборка экстремальных значений сил соответствовала налагаемым требованиям достоверности. Замеры выполнялись для участка, соответствующего росту призмы волочения.

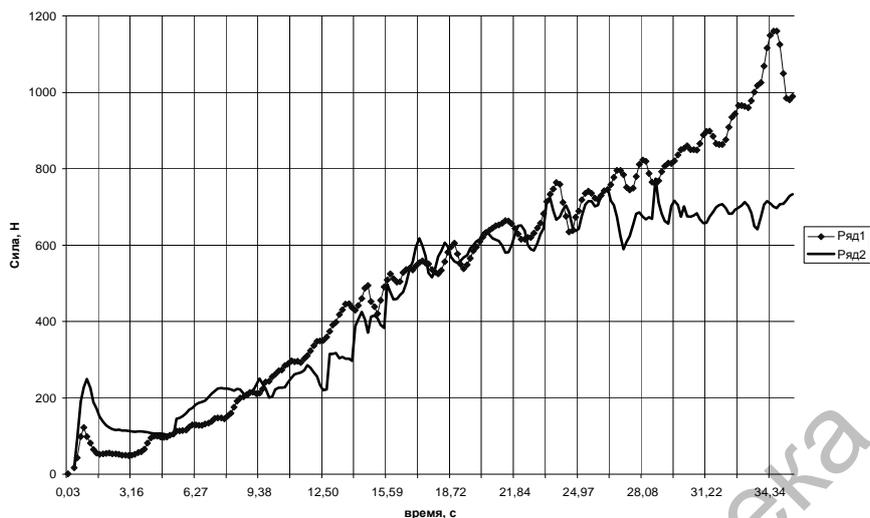


Рис. 7. Оциллограмма сил сопротивления копанию при толщине стружки 4 см: 1 – модель отвала «БЕЛАРУС-1502»; 2 – модель отвала с рекомендуемыми параметрами

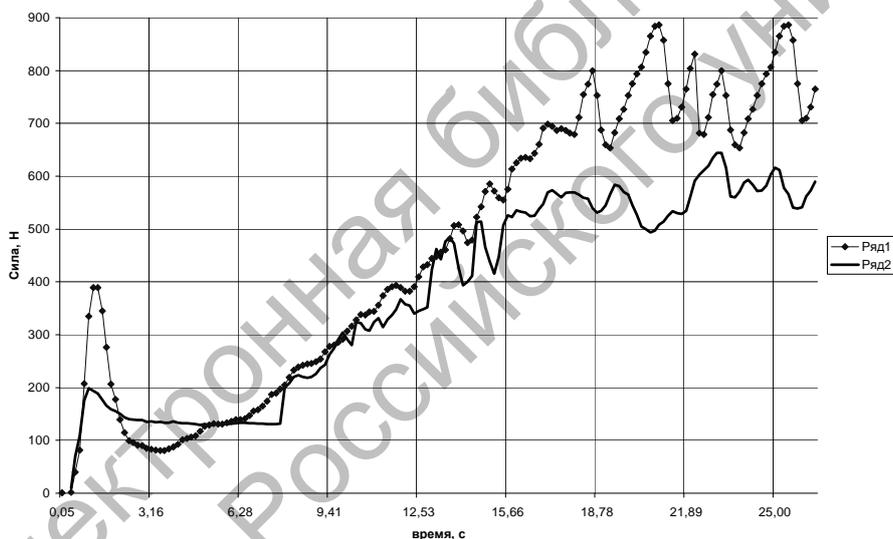


Рис. 8. Оциллограмма сил сопротивления копанию при толщине стружки 3 см: 1 – модель отвала «БЕЛАРУС-1502»; 2 – модель отвала с рекомендуемыми параметрами

С этой целью проводились начальные эксперименты, данные для которых снимались на всей протяженности участка копания. После чего с помощью программного обеспечения MS Excel определялись среднее арифметическое количества колебаний и разницы между соседними максимумами в процессе роста призмы волочения, их максимальные значения и среднеквадратичное отклонение.

Для определения необходимого числа опытов предварительно было проведено 10 опытов при одних и тех же условиях. По полученным средним значениям количества колебаний и математического ожидания разницы между соседними максимумами осуществлялась статистическая обработка, на основании результатов которой, используя методику [12], можно было найти рекомендуемое количество опытов. Результаты представлены в табл. 3.

Табл. 3. Статистические данные опытов

Номер опыта	Количество колебаний	Математическое ожидание разницы между максимумами
1	15	33,3788
2	12	34,846
3	14	42,182
4	13	35,9464
5	11	41,0816
6	13	42,182
7	12	38,514
8	15	32,6452
9	14	41,4484
10	14	35,9464
Математическое ожидание	13,3	31,51
Среднеквадратичное отклонение	1,26	7,22
Коэффициент вариации	9,47	22,9
$\frac{K_{\text{ДОП}}}{K_{\text{ВАР}}}$	1,26	0,52
Необходимое количество опытов		5

Таким образом, для каждой из модели отвала с рекомендуемыми параметрами проводилось пять опытов при толщине стружки 0,02 м с записью результатов измерений в файл и последующим их статистическим анализом.

#### **Сопоставление экспериментальных и теоретических исследований**

Экспериментальные данные, вследствие их неизбежного рассеяния, должны обрабатываться статистическими методами. Для каждого опыта из имеющихся значений составляющих сопротивления резанию определялось их среднее значение. После этого по результатам всех опытов, проводимых при одних и тех же условиях, окончательно рассчитывалось среднее значение параметра, по которому и выявлялось расхождение с расчетным значением.

При сопоставлении экспериментальных результатов с теоретическими,

определенными по разработанной методике, возможны их расхождения, причинами которых являются:

- допущения, принятые в методике расчета и в расчетных схемах;
- неизбежные погрешности измерений при экспериментальных исследованиях;
- неизбежные погрешности при определении физико-механических свойств грунта.

Расхождения теоретических и экспериментальных значений для горизонтальной составляющей сопротивления резанию приведены в табл. 4. Результаты получены для первой категории грунта при толщине стружки 0,02 м, радиусе криволинейной части отвала 1,2 м, угле резания 53°, угле установки отвала 71°, длине прямолинейной части отвала 0,2 м. Сопоставительный анализ представлен в табл. 4.

Табл. 4. Экспериментальные и теоретические результаты исследований

Номер опыта	Количество колебаний	Математическое ожидание разницы между максимумами	Среднеквадратичное отклонение
1	11	33,8	7,2
2	11	47,6	8,6
3	13	34,9	9,4
4	15	31,2	7,1
5	14	42,7	10,8
Теоретическое значение	14	35,6	9,5

Анализ результатов (см. табл. 4) показывает, что значения математического ожидания разницы между пиками колебаний находятся внутри диапазона тех же значений, полученных экспериментальным путем. Результаты аналогичны и для среднеквадратичного отклонения.

### Выводы

Экспериментальные исследования подтвердили результаты теоретических исследований, проведенных с помощью методик, разработанных авторами.

Накопленный экспериментальный материал, полученный при разных режимах работы, позволил выполнить сопоставительный анализ по параметрам, доступным инструментальному контролю.

Анализ показал, что разработанные теоретические положения, используемые для копания грунта отвалом

бульдозера, адекватно отражают характер явлений, происходящих при этом виде копания, и дают хорошую сходимость с экспериментальными результатами.

Наиболее существенное влияние на величины сил сопротивления копания оказывает величина радиуса криволинейной части отвала. Увеличение радиуса на 40 % привело к снижению сил сопротивления копания на завершающей стадии (при полной призме волочения) на 20...30 % в зависимости от толщины стружки.

Значения радиуса криволинейной части профиля отвала бульдозера, получаемые при проектировании на основании [14], необходимо увеличивать на 30...40 %, если есть необходимость снижения сил сопротивления копания, при разработке грунтов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ветров, Ю. А.** Расчеты сил резания и копания грунтов / Ю. А. Ветров. – Киев : Изд-во Киев. ун-та, 1965. – 123 с.
2. **Дидух, Б. И.** Упругопластическое деформирование грунтов / Б. И. Дидух. – М. : Изд-во Ун-та дружбы народов, 1987. – 168 с.
3. **Завьялов, А. М.** Экспериментальные исследования процесса копания грунта неповоротным отвалом бульдозера / А. М. Завьялов, Т. Е. Болдовская // Строительные и дорожные машины. – 2007. – № 6. – С. 21–28.
4. **Домбровский, Н. Г.** Землеройные машины / Н. Г. Домбровский, С. А. Панкратов. – М. : Госстройиздат, 1961. – 321 с.
5. **Ветров, Ю. А.** Сопротивление грунтов резанию / Ю. А. Ветров. – Киев : Изд-во Киев. ун-та, 1962. – 96 с.
6. **Берестов, Е. И.** Сопротивление грунтов резанию / Е. И. Берестов // Изв. вузов. Строительство. – 1997. – № 10. – С. 102–107.
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.

8. **Баловнев, В. И.** Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В. И. Баловнев. – М. : Высш. шк., 1981. – 336 с.

9. **Баловнев, В. И.** Новые методы расчета сопротивлений резанию грунтов / В. И. Баловнев. – М. : Росвузиздат, 1963. – 95 с.

10. **Баловнев, В. И.** Методы физического моделирования рабочих процессов дорожно-строительных машин / В. И. Баловнев. – М. : Машиностроение, 1974. – 232 с.

11. **Берестов, Е. И.** Математическое моделирование динамических процессов при резании грунта / Е. И. Берестов // Совершенствование существующих и создание новых ресурсосберегающих технологий и оборудования в машиностроении, сварочном производстве и строительстве : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 3–5 мая 1991 г. – Могилев, 1991. – С. 56–58.

12. **Зеленин, А. Н.** Физические основы теории резания грунтов / А. Н. Зеленин. – М. : АН СССР, 1950. – 187 с.

13. **Зеленин, А. Н.** Основы разрушения грунтов механическими способами / А. Н. Зеленин. – М. : Машиностроение, 1968. – 198 с.

14. Справочник конструктора дорожных машин / И. П. Бородачев [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1973. – 504 с.

*Статья сдана в редакцию 20 января 2015 года*

**Игорь Вадимович Лесковец**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: le@bru.by.

**Евгений Иванович Берестов**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.  
Тел.: +375-291-24-89-95.

**Алла Петровна Смоляр**, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет.

**Igor Vadimovich Leskovets**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: le@bru.by.

**Yevgeny Ivanovich Berestov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-291-24-89-95.

**Alla Petrovna Smolyar**, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University.