

УДК 621.87:658.512.011.56

## ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ГРУНТА НА УСИЛИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОПАНИЮ РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ БУЛЬДОЗЕРА

*д-р техн. наук, проф. Е.И. БЕРЕСТОВ, канд. техн. наук, доц. И.В. ЛЕСКОВЕЦ  
(Белорусско-Российский университет, Мозилев)*

*Представлена методика определения сил сопротивления копанью отвалом бульдозера на основе анализа процессов, происходящих при отделении стружки от массива грунта и движении призмы волочения. Обоснована расчетная схема, на основании которой выделены характерные геометрические элементы рабочего оборудования и призмы волочения. С помощью предлагаемой методики проанализированы силы сопротивления копанью, возникающие на рабочем оборудовании, которое применяется на серийной технике. Рассмотрено влияние на них параметров грунта. Сравнение средних значений сил сопротивления копанью показали адекватность результатов, полученных с использованием предлагаемых методов. Установлен характер влияния на силы сопротивления копанью отвалом бульдозера различных параметров грунта. Выявлены рациональные области высоты вырезаемой стружки для конкретного бульдозерного отвала. Сделано заключение о перспективности предлагаемых методов расчета.*

**Введение.** Бульдозеры как машины с рабочим оборудованием, обладающим высокими свойствами надежности, долговечности, простотой в изготовлении, широко применяются в сельском хозяйстве, строительном и промышленном производстве. Первые сведения о бульдозерах известны еще с XIX века. Наиболее активно в то время бульдозеры применялись на территории России при строительстве железных дорог. Примерно к тому же времени относятся и первые научные работы, посвященные выбору параметров рабочего оборудования бульдозеров, которое отвечало бы требованиям надежности, высокой производительности и экономичности. Научные положения, посвященные исследованию процессов резания и копания грунтов, а также взаимодействия рабочего органа с рабочей средой, разрабатываются параллельно с грунтоведением и в послевоенный период [1 – 3]. Бурный рост темпов строительного производства потребовал использования научного подхода к анализу процессов копания грунта с привлечением современных методов исследования и математического аппарата. Существенный вклад в развитие теории разработки грунтов внесли Ю.А. Ветров, А.Н. Зеленин, Н.Г. Домбровский, К.А. Артемьев и другие ученые. Большое количество проведенных экспериментальных исследований привело к разработке рекомендаций по проектированию отвальных рабочих органов, в частности отвалов бульдозеров, и рабочего оборудования в целом.

**Структура и параметры рабочего оборудования, определение усилий сопротивления копанью.** На основании результатов экспериментальных исследований, посвященных определению сил сопротивления копанью отвальными рабочими органами, в настоящее время, как правило, применяется схема, изображенная на рисунке 1.

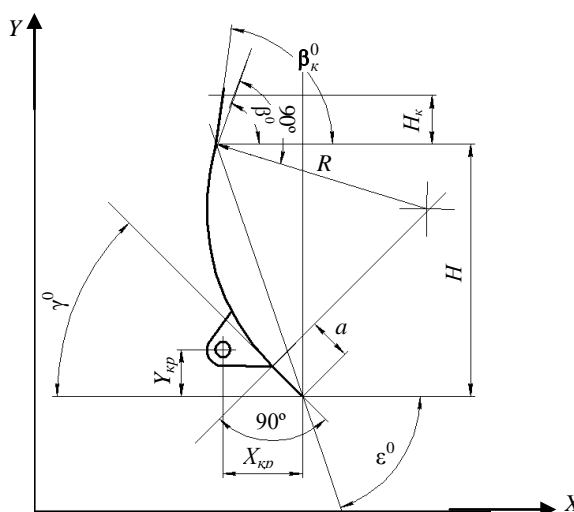


Рис. 1. Схема отвала:

$H$  – высота отвала;  $H_k$  – высота козырька отвала;  $\gamma^0$  – угол резания;  $\epsilon^0$  – угол установки отвала;

$\beta^0$  – угол опрокидывания;  $\beta_k^0$  – угол установки козырька;  $a$  – длина ножевой части;

$X_{кр}$ ,  $Y_{кр}$  – соответственно расстояния от точки крепления на раме до начала ножевой части

Схема предполагает графоаналитический метод построения образующей отвала. Такая схема с незначительными вариациями используется при проектировании отвалов для бульдозеров на базе тракторов различных тяговых классов. В целом представленная форма и параметры отвалов являются типовыми и, как правило, обеспечивают наилучшие показатели процесса разработки грунта независимо от тягового класса базовой машины.

Основная задача определения параметров процесса копания – определение сил сопротивления копанию грунтов различных категорий. На протяжении более чем ста лет проводятся исследования, посвященные разработке методик определения сил сопротивления копанию с целью их минимизации. Одной из первостепенных проблем при определении сил сопротивления копанию является нестабильность параметров разрабатываемой среды. Значения параметров грунта, оказывающих влияние на величины сил сопротивления копанию, могут колебаться в широких пределах, в зависимости от внешних и внутренних факторов, таких как температура, влажность, гранулометрический состав, условия залегания, процентное содержание различных включений. В настоящее время при определении сил сопротивления копанию используется несколько параметров грунта: коэффициент удельного сопротивления резанию, коэффициент трения грунта по металлу, коэффициент трения грунта по грунту, удельная плотность [4 – 6]. Эти параметры используются и при определении силы  $W_1$  сопротивления резанию грунта:

$$W_1 = kbh, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент удельного сопротивления резанию, принимаемый в зависимости от категории грунта и типа рабочего органа;  $b$  – ширина резания;  $h$  – толщина вырезаемой стружки.

Для определения силы  $W_2$  сопротивления перемещению призмы волочения используется зависимость:

$$W_2 = V\delta_p g\mu_2, \quad (2)$$

где  $V$  – объем призмы волочения;  $\delta_p$  – плотность разрыхленного грунта;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\mu_2$  – коэффициент трения грунта по грунту.

Сила сопротивления перемещению грунта вверх по отвалу определяется по формуле:

$$W_3 = V\delta_p\mu_1 \cos^2 \gamma, \quad (3)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент трения грунта по металлу;  $\gamma$  – угол резания.

Общее сопротивление копанию в данном случае определяется как сумма:

$$W_K = W_1 + W_2 + W_3. \quad (4)$$

Представленная методика, однако, не позволяет учитывать целый ряд параметров не только грунта, но и отвала.

**Основная часть.** Авторами данной статьи разработана и реализована на ЭВМ в виде программного обеспечения методика определения параметров грунта, основанная на теории предельных состояний. Эта методика позволяет учитывать максимальное количество параметров грунта и отвала, оказывающих наиболее существенное влияние на силы сопротивления копанию [4].

Суть предлагаемой методики [5] заключается в определении угла сдвига  $\phi$  (рис. 2) при возникновении нормальных и касательных напряжений, обусловленных продвижением отвала в грунте.

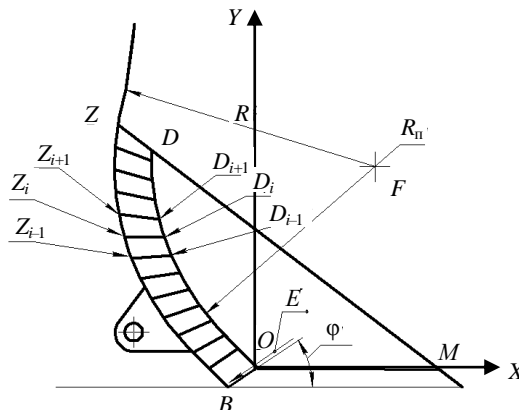


Рис. 2. Геометрическая схема элементов грунта и отвала

В методике используется плоская модель. Движение отвала рассматривается в плоскости  $XOY$ ; заглубленный в грунт отвал – с призмой волочения. Величина заглубления отвала определяется разностью координат точек  $O$  и  $B$  по оси абсцисс. Призма волочения условно разбивается на подвижную и неподвижную части. Подвижная часть формирует поток грунта  $OBZD$ , неподвижная часть находится между точками  $ODM$ . Подвижная часть разбивается на сегменты  $Z_i, Z_{i+1}, D_i, D_{i+1}$ . Каждый сегмент взаимодействует с неподвижным участком, отвалом и верхним и нижним соседними участками подвижной части потока. Первый сегмент, отделившийся от грунта в естественном залегании, и неподвижная часть призмы волочения воздействуют на разрушаемый материал и совместно с отвалом, создающим нормальные и касательные напряжения, формируют угол сдвига. Величина этого угла определяет площадь площадки скольжения. В каждый анализируемый момент времени в зависимости от площади площадки скольжения определяется усилие сопротивления резанию. Усилия сопротивления перемещению подвижной и неподвижной частей призмы волочения определяются с учетом массы грунта и сил трения в местах взаимных перемещений анализируемых элементов.

Свойства грунта предлагается учитывать с помощью таких параметров, как: число ударов плотномера ДорНИИ, которое используется для определения категории грунта; категория грунта (для разработки бульдозерным оборудованием применяется от 1 до 3 и зависит от числа ударов плотномера ДорНИИ); плотность ( $\tau/\text{м}^3$ ); коэффициент разрыхления; удельное сцепление (кПа); удельное остаточное сцепление (кПа); угол внутреннего трения (град); угол трения грунта по металлу (град); объемный коэффициент жесткости ( $\text{Н}/\text{м}^3$ ).

**Теоретические исследования.** С использованием представленной методики проводились теоретические расчеты по определению сил сопротивления копания для рабочего оборудования бульдозера специального карьерного МоА3-40489. На предварительной стадии расчетов приняты параметры отвала, приближенные к параметрам анализируемой машины. В соответствии с рисунком 1 параметры отвала приведены в таблице 1. Сечение отвала с заданными параметрами представлено на рисунке 3.

Таблица 1

Параметры отвала

Наименование параметра	Значение
Высота отвала ( $H$ ), м	0,8
Высота козырька ( $H_k$ ), м	0,5
Точка крепления ( $X_{кр}$ ), м	0,476
Точка крепления ( $Y_{кр}$ ), м	0,476
Длина прямолинейной части отвала ( $a$ ), м	0,238
Ширина отвала ( $B$ ), м	4,2
Радиус кривизны отвала ( $R$ ), м	0,6
Угол опрокидывания ( $\beta$ ), град	65
Угол установки козырька ( $\beta_k$ ), град	72
Угол установки отвала ( $\epsilon$ ), град	71
Угол резания ( $\gamma$ ), град	55

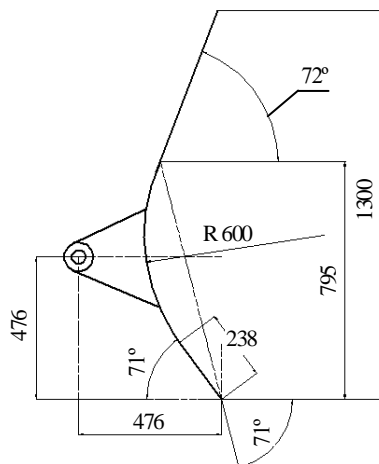


Рис. 3. Сечение отвала с заданными параметрами

Учитывая, что на современном этапе невозможно установить однозначные величины параметров грунта в зависимости от категории, на предварительной стадии расчетов необходимо провести сравнение результатов определения сил сопротивления копанию по зависимостям (1) – (4) и представленной методике и определить параметры грунтов для последующих расчетов. Зная, что высота призмы волочения оказывает существенное влияние на сопротивление копанию, проведем расчеты с минимальной высотой призмы волочения, средней величиной и максимальной.

Параметры грунта, принятые для расчетов, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Расчетные значения параметров грунта

Наименования параметров	Идентификационное имя				
	1к2500	1к3000	1к3500	2к4000	2к4500
	Категория				
	1	1	1	2	2
Значения					
Плотность, т/м <sup>3</sup>	1,2	1	2	2	2
Число ударов плотномера ДорНИИ	1	2	4	6	8
Коэффициент разрыхления	1,08	1	1	1	1
Удельное сопротивление резанию, кПа	12	40	60	96	124
Удельное сцепление, кПа	4	18	20	27	35
Удельное остаточное сцепление, кПа	0	15	2	3	3
Угол внутреннего трения, град	28	29	30	31	32
Угол трения грунта по металлу, град	26	27	28	29	30
Объемный коэффициент жесткости, кПа/м	2500	3000	3500	4000	4500

Результаты предварительных расчетов отразим на диаграммах (рис. 4 – 6). По оси ординат откладываем толщину стружки ( $h$ ), по оси абсцисс – величину силы сопротивления резанию ( $W$ ).

Принятые обозначения:  $W_s$  – сила сопротивления копанию, определяемая по общепринятой методике;  $W_n$  – сила сопротивления копанию, определяемая по предлагаемой методике;  $W_{\max}$  – максимальная сила сопротивления копанию, определяемая по предлагаемой методике;  $W_{\min}$  – минимальная сила сопротивления копанию, определяемая по предлагаемой методике.

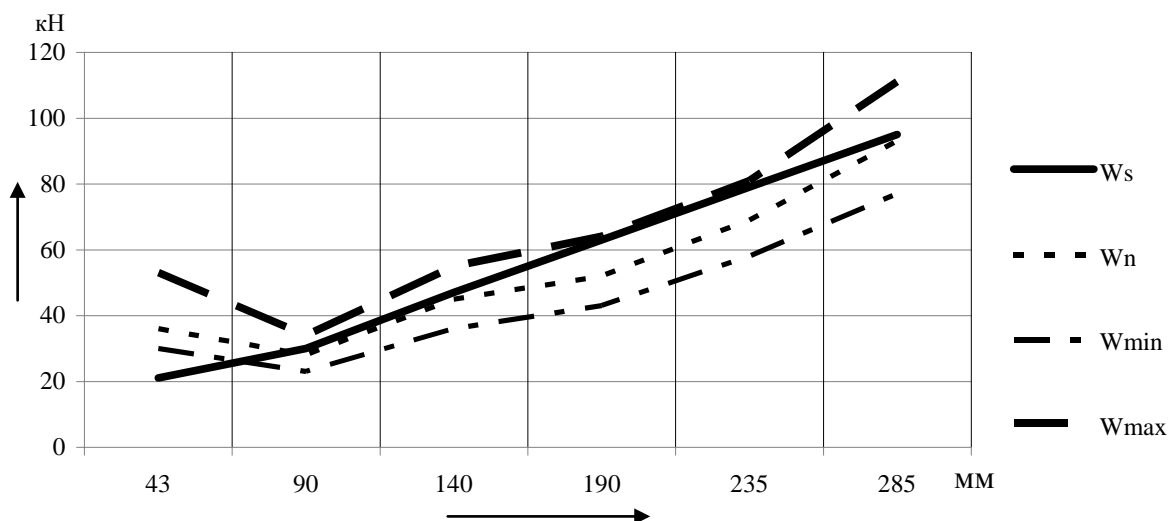


Рис. 4. Зависимость сил сопротивления копанию от высоты вырезаемой стружки при заданных параметрах (высота призмы волочения 45 мм; идентификационное имя грунта 1к3500; плотность грунта 1,53 т/м<sup>3</sup>)

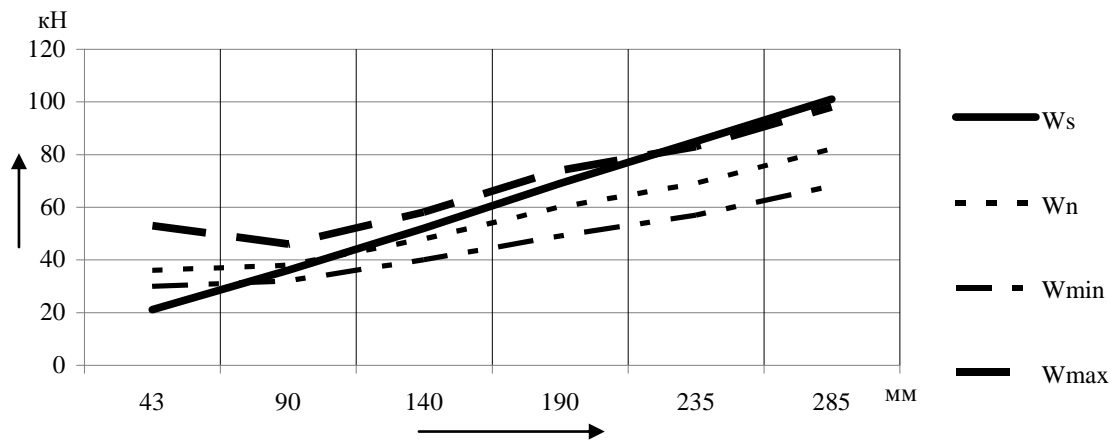


Рис. 5. Зависимость сил сопротивления копанию от высоты вырезаемой стружки при заданных параметрах (высота призмы волочения 300 мм; идентификационное имя грунта 1к3500; плотность грунта 1,53 т/м<sup>3</sup>)

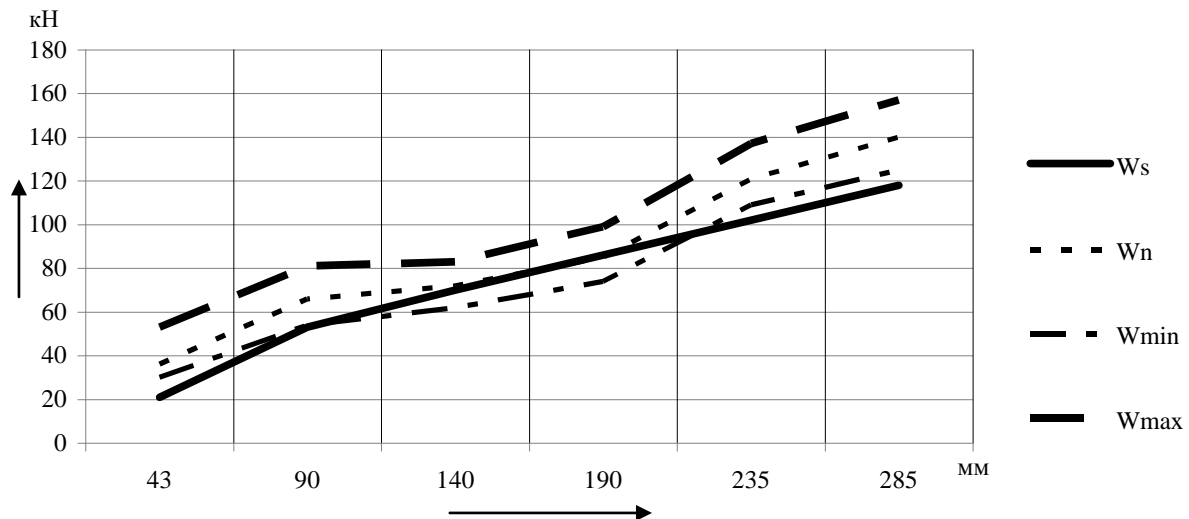


Рис. 6. Зависимость сил сопротивления копанию от высоты вырезаемой стружки при заданных параметрах (высота призмы волочения 600 мм; идентификационное имя грунта 1к3500; плотность грунта 1,53 т/м<sup>3</sup>)

Анализ диаграмм (см. рис. 4 – 6) показывает рост сил сопротивления копанию в зависимости от высоты призмы волочения, что соответствует общепринятым представлениям.

На начальном этапе разработки грунта при малой призме волочения рост сил сопротивления копанию незначительный, что обусловлено невысокой массой грунта, удерживающей грунт от сдвига при продвижении вперед отвала бульдозера. Дополнительным фактором является расположение призмы волочения в ее начальной стадии практически целиком на отвале бульдозера, когда практически отсутствуют силы трения призмы волочения о грунт. Силы сопротивления копанию, определенные по общепринятой методике, располагаются внутри области, ограниченной минимумом и максимумом сил, определенной по методике, предлагаемой авторами. Таким образом, можно считать предлагаемую методику адекватной.

Проанализируем зависимости средних сил сопротивления копанию  $W_n$  от плотности грунта при одинаковых прочих параметрах. Типы линий соответствуют разной плотности грунта (рис. 7).

Анализ показал, что в целом силы сопротивления копанию увеличиваются в зависимости от плотности грунта, что соответствует сути физических процессов. Однако при больших значениях плотности минимальная толщина стружки может привести к увеличению сил сопротивления копанию.

В соответствии с традиционной методикой расчета минимальная толщина стружки определяется как

$$h_{\min} = \frac{\Delta V}{B^2},$$

где  $\Delta$  – опытный коэффициент, равный 0,29 для связных грунтов и 0,45 – для малосвязных.

Тогда для нашего случая рекомендуемая высота вырезаемой стружки колеблется в пределах от 0,01 до 0,02 м.

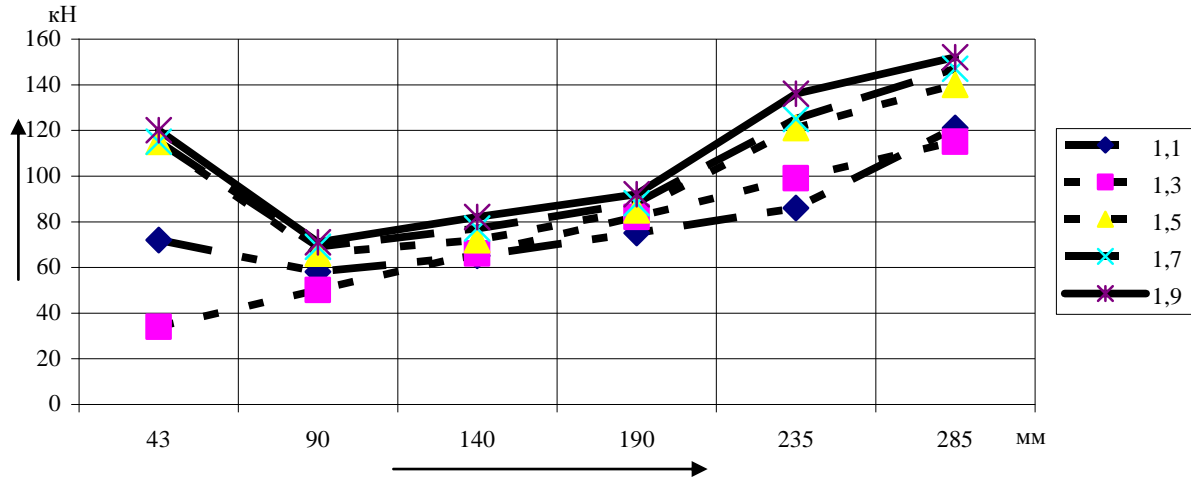


Рис. 7. Зависимость сил сопротивления копанию от высоты вырезаемой стружки при разной плотности грунта, остальные параметры грунта соответствуют идентификационному имени 1к3500 таблицы 2

Рисунок 7 показывает, что оптимальная область высоты вырезаемой стружки, с точки зрения минимизации сил сопротивления копанию, лежит в пределах от 0,09 до 0,2 м. Многие авторы получали такие значения при проведении экспериментальных исследований. Однако традиционные расчетные методы не позволяли получить рекомендуемые значения высоты стружки с точки зрения снижения сил сопротивления копанию.

Проанализируем зависимость сил сопротивления копанию от угла наклона призмы волочения. Типы линий, соответствующие различным углам наклона призмы волочения, представлены на рисунке 8.

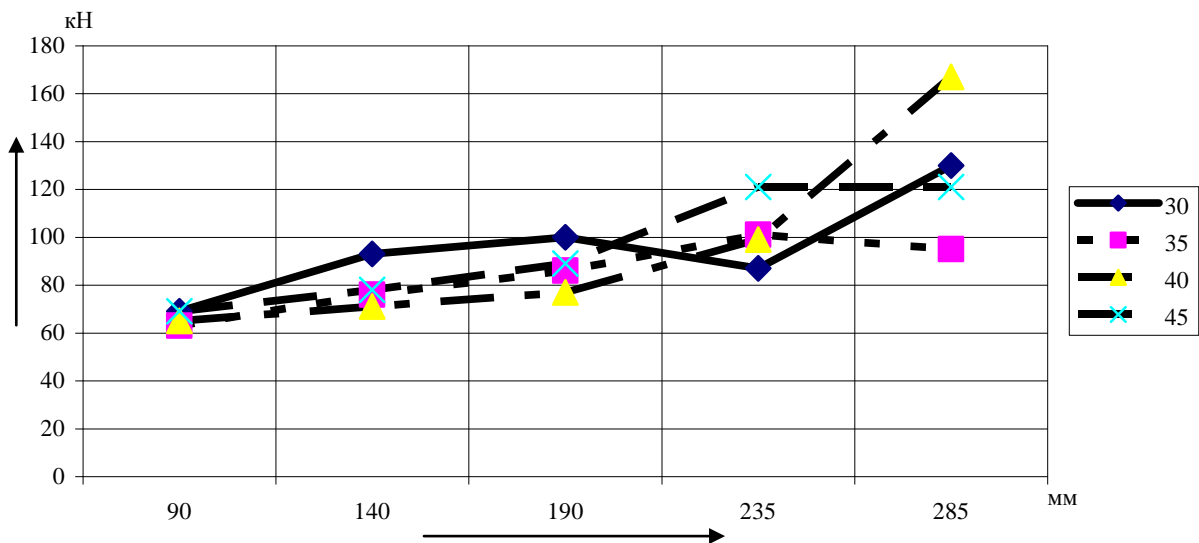


Рис. 8. Влияние высоты вырезаемой стружки на силы сопротивления копанию при различных значениях угла наклона призмы волочения

Анализ рисунка 8 показывает, что угол наклона призмы волочения оказывает неоднозначное влияние на силы сопротивления копанию. Зависимость такого типа в учебной литературе не приводится.

При проектировании отвалов бульдозеров практически невозможно учесть этот параметр, так как значения углов наклона призмы волочения зависят от многих параметров, характеризующих состояние грунта, таких как: гранулометрический и микроагрегатный состав, пористость и трещиноватость, состав газов, влажность, температура и др.

В рациональной области копания (для рассматриваемого случая находится в диапазоне от 0,09 до 0,2 м) значения сил сопротивления копанию при разных значениях угла наклона призмы волочения отличаются друг от друга незначительно.

На основании этого можно сделать вывод о том, что угол наклона призмы волочения можно не учитывать при проектировании отвалов бульдозеров, по крайней мере на данном этапе развития теоретических методов расчета.

Проанализируем зависимость сил сопротивления копанию от угла трения грунта по металлу при остальных значениях параметров грунта, соответствующих идентификационному имени 1к3500 таблицы 2. Типы линий, соответствующие различным углам трения грунта по металлу, представлены на рисунке 9.

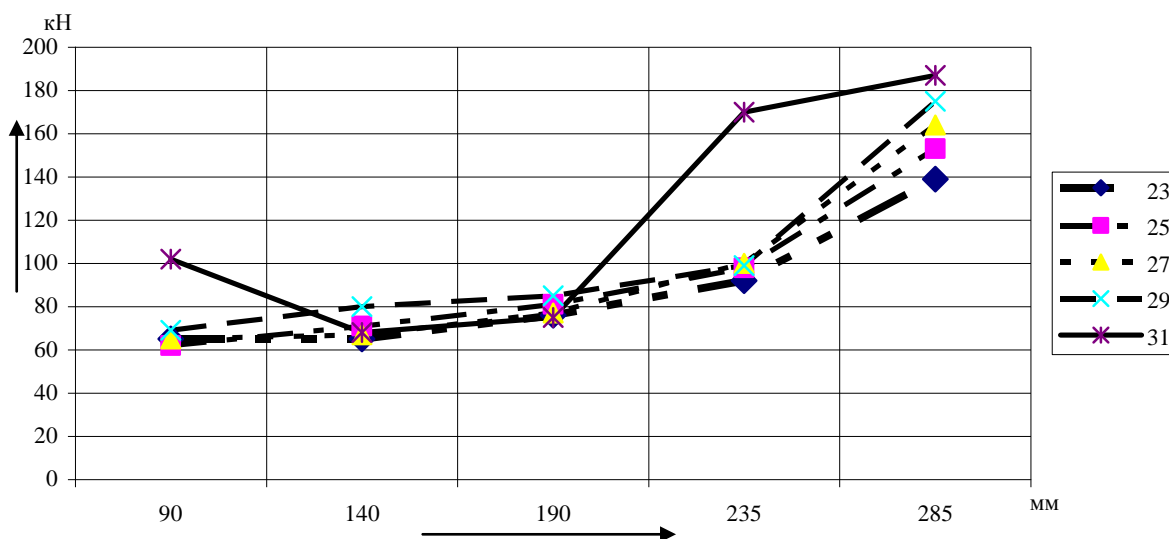


Рис. 9. Влияние высоты вырезаемой стружки на силы сопротивления копанию при различных значениях угла трения грунта по металлу

Анализ рисунка 9 показывает, что при увеличении угла трения грунта по металлу от 23 до 29 градусов силы сопротивления копанию незначительно увеличиваются, однако при больших величинах вырезаемой стружки и увеличении анализируемого угла до 31 градуса это увеличение значительно и превышает минимальные почти в два раза. Тем не менее во всем диапазоне углов существует рациональная область высоты вырезаемой стружки от 0,14 до 0,2 м, при которой силы сопротивления копанию отличаются незначительно. В этой области влияние угла трения грунта по металлу для грунтов с данными параметрами можно не учитывать.

**Заключение.** Предлагаемая авторами методика позволяет оценивать работоспособность отвалов бульдозера при различных параметрах грунтов в качественных и количественных показателях. Адекватность методики подтверждается сравнением полученных с ее помощью результатов с результатами, полученными с помощью апробированных методов.

С помощью программного обеспечения, основанного на использовании современных методов определения сил сопротивления копанию, возможно проведение расчетов, посвященных определению сил сопротивления копанию рабочим оборудованием бульдозера с учетом различных параметров, характеризующих состояние грунта, что позволяет уточнить влияние параметров грунта на силы сопротивления копанию. Определение сил сопротивления копанию с учетом большого количества параметров позволит на стадии проектирования машины исключить заведомо неудачные варианты и выбрать наиболее оптимальный, учитывающий условия работы конкретной машины, в том числе возможен учет запросов организаций, эксплуатирующих технику в заранее известных ограниченных условиях.

Использование предлагаемой авторами методики позволит:

- осуществлять проектирование отвалов с учетом возможностей использования в различных грунтовых условиях, ориентируясь на конкретное назначение данного бульдозерного оборудования, в том числе с измененными углом резания, радиусом кривизны;

- варьировать углом установки отвала и другими параметрами.

Значения усилий, полученные в результате предварительных расчетов на стадии проектирования машины, могут быть использованы при проведении расчетов методом конечных элементов с целью определения наиболее нагруженных пространственных элементов конструкций. Результаты данных расчетов могут привести к снижению металлоемкости проектируемых и модернизированных машин, а также к повышению надежности и долговечности.

Кроме определения уточненных усилий на стадии проектирования, использования этих усилий при прочностных расчетах, с помощью предлагаемой методики возможно проведение анализа различных стадий копания с целью разработки критериев изменения угла установки отвала на стадиях заглубления, наполнения отвала, транспортирования грунта и выгрузки с целью минимизации затрат.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Щучкин, Н.В. Трение скольжения почвы по металлу и почве / Н.В. Щучкин // Почвообрабатывающие машины: сб. – М.: Машгиз, 1949. – Вып. 4.
2. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Госстройиздат, 1951.
3. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – М.: Изд-во иностр. лит., 1951.
4. Справочник конструктора дорожных машин / И.П. Бородачев [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1973. – 504 с.
5. Зеленин, А.Н. Машины для земляных работ: учеб. пособие для вузов / А.Н. Зеленин, В.И. Баловнев, И.П. Керов. – М.: Машиностроение, 1975. – 421 с.
6. Домбровский, Н.Г. Землеройные машины / Н.Г. Домбровский, С.А. Панкратов. – М.: Гостройиздат, 1961 с.
7. Сергеев, Е.М. Грунтоведение / Е.М. Сергеев. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. – 594 с.

Поступила 03.01.2011

#### THE INFLUENCE OF THE SOIL NATURE ON THE RESISTANCE FORCE TO THE DIGGING OF THE BULLDOZER WORK EQUIPMENT

*E. BERESTOV, I. LESKOVETS*

*The paper presents a method for determining the forces of resistance to digging by a bulldozer blade on the basis of the analysis of the processes occurring during the separation of the chip from an array of ground as well as during the movement of the drawing prism. The settlement scheme on which basis characteristic geometrical elements of the working equipment and a drawing prism are allocated is proved. By means of an offered technique forces of resistance the diggings arising on the working equipment which is applied on the serial technics are analysed. Influence on forces of resistance to digging of parametres of a ground is analysed. Character of influence on forces of resistance to digging by a sailing of the bulldozer of various parametres of a ground is established. Rational areas of height of a cut out shaving for concrete бульдозерного a sailing are revealed. The conclusion about perspectivity of offered methods of calculation of forces of resistance to digging is made.*