

## МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.87:658.512.011.56

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСИЛИЙ НА РАБОЧЕМ ОБОРУДОВАНИИ БУЛЬДОЗЕРА

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

Обоснована необходимость разработки методики определения сил сопротивления копанью отвалом бульдозера на основе анализа процессов, происходящих при отделении стружки от массива грунта и движении призмы волочения. Представлена расчетная схема, на основании которой выделены характерные геометрические элементы рабочего оборудования и призмы волочения. Изложена методика определения сил, возникающих в призме волочения при движении стружки вверх по отвалу. Предлагается метод определения угла большого сдвига на основе анализа предельных напряжений, который может выдержать грунт с учетом всех сил и давлений. Предлагаемая методика предназначена для реализации на ЭВМ с использованием численных методов расчета. Результаты, полученные с использованием предлагаемых методов расчета, могут быть использованы при проектировании рабочего оборудования с отвальным рабочим органом, а также при проектировании гусеничных и колесных тракторов.

**Введение.** Постоянный рост цен на энергоресурсы требует от производителей строительных и дорожных машин изготовления техники, обладающей высокой экономичностью. Для достижения этой цели требуется постоянное совершенствование методов расчетов металлоконструкций, трансмиссий, двигателей, движителей, рабочего оборудования. В последние десятилетия широкое распространение нашли программные продукты, основанные на использовании метода конечных элементов. Использование этих технологий позволяет производителям отраслей машиностроения, в том числе и автотракторостроения, создавать машины на основе более глубокого анализа процессов, происходящих при работе машины. Однако существуют области, где применение методов конечных элементов затруднено из-за значительных сложностей, возникающих при определении нагрузок на различные системы машины известными теоретическими способами. К таким областям относятся машины для земляных работ. Для определения нагрузок на рабочее оборудование бульдозера при копании в настоящее время используются упрощенные методики, разработанные в 30 – 70 годы XX века [1]. Такие методики разработаны в период отсутствия вычислительной техники и методов, позволяющих производить более точные расчеты параметров, характеризующих процессы, происходящие при работе строительных и дорожных машин. Наличие компьютеров практически в каждой организации и широкое использование ЭВМ в промышленности позволяет применять современные методы вычислений. В статье изложена методика определения нагрузок на отвал бульдозера при копании. Рабочее оборудование бульдозера представлено на рисунке 1 и состоит из отвала, толкающих брусьев, гидроцилиндра подъема-опускания отвала.

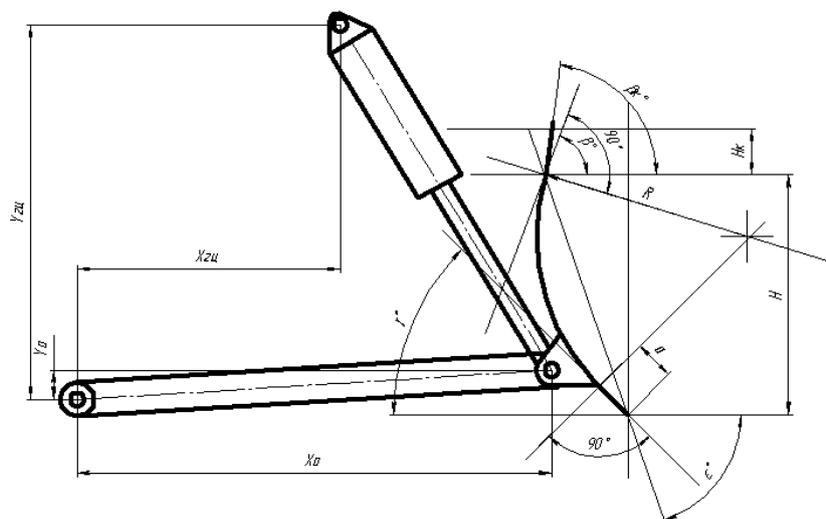


Рис. 1. Рабочее оборудование бульдозера

**Формирование рабочего оборудования.** Для проведения расчетов необходимо задать параметры, определяющие геометрию элементов рабочего оборудования и их взаимное расположение:

- для отвала:  $\varepsilon$  – угол установки отвала;  $X_{кр}$  – расстояние от кромки ножа до точки крепления отвала на тяговой раме по оси абсцисс;  $Y_{кр}$  – расстояние от кромки ножа до точки крепления отвала на тяговой раме по оси ординат;  $\gamma$  – угол резания,  $\alpha$  – длина прямолинейной части отвала;  $H$  – высота отвала без учета козырька;  $R$  – радиус кривизны отвала;  $F$  – точка, координаты которой задают положение центра кривизны отвала в декартовой системе координат;  $\beta_k$  – угол установки козырька отвала;  $H_k$  – высота козырька отвала;  $\beta$  – угол опрокидывания козырька отвала;

- для гидроцилиндра подъема-опускания отвала: диаметр поршневой полости; диаметр штоковой полости; минимальная и максимальная длины гидроцилиндра по осям крепления к раме трактора и раме рабочего оборудования;

- для толкающих брусьев: длина рамы от точки крепления отвала до точки крепления на раме трактора задается размерами  $X_a$  и  $Y_a$ .

Расположение точки крепления гидроцилиндра к раме трактора задается величинами  $X_{ци}$  и  $Y_{ци}$ .

В системе рабочее оборудование – разрабатываемая среда существенные сложности возникают при моделировании последней. Для проведения расчетов с учетом воздействия грунта используем следующие данные: углы внутреннего трения; трения грунта по металлу; естественного откоса; удельное сцепление грунта ненарушенной структуры; удельное сцепление грунта нарушенной структуры (в призме волочения); плотность в условиях естественного залегания; коэффициент разрыхления; коэффициент объемной жесткости (значения коэффициента зависят от категории грунта и задаются в  $\text{Н/м}^3$ ).

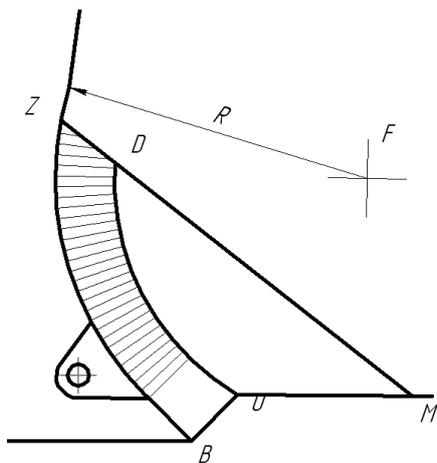


Рис. 2. Отвал с призмой волочения

При копании грунта происходит отделение стружки от массива грунта и формирование призмы волочения.

Рассмотрим плоскую модель отвала и призмы волочения, изображенную на рисунке 2.

**Методика расчета.** Разобьем призму волочения  $MDZBO$  на треугольник  $MDO$  с криволинейной частью  $DO$ , который условно будем считать неподвижным, и поток  $ZDOB$ , который под действием сил, вызываемых отделением стружки, продвигается вверх по отвалу и под действием сил тяжести и инерции, осыпаясь под углом, близким к углу естественного откоса, формирует призму волочения. Площадка большого сдвига  $BO$  формируется под действием сил со стороны режущей части отвала, с одной стороны, и сил от веса призмы волочения – с другой. Силы от веса призмы волочения оказывают воздействие на площадку  $OM$ . В начальной стадии копания призма волочения отсутствует. Для определения усилий, возникающих в потоке  $ZDOB$ , разобьем его на сегменты. Учитывая, что центр потока находится в точке  $F$ , расположение сегментов определяется радиусом  $R$  и длиной площадки  $OB$ , которая зависит от угла ее наклона к горизонту.

Этот угол называется углом большого сдвига. Очевидно, что нахождение данного угла в совокупности с другими параметрами, такими как высота призмы волочения, длина призмы волочения, которая характеризуется положением точки  $M$ , позволит определить более точно усилия воздействия на рабочее оборудование при копании.

Зададимся начальным значением угла большого сдвига. Тогда сможем определить начальный размер площадки  $BO$ . Зная величины смещения отвала на каждом шаге и высоту стружки, определяем новую площадь призмы волочения как

$$S_{пр} = S_{пр}^{-1} + \frac{l \cdot h}{\sin(\gamma)},$$

где  $S_{пр}^{-1}$  – площадь призмы волочения на предыдущем шаге расчета;  $l$  – путь, пройденный отвалом;  $h$  – высота стружки.

Зная угол наклона призмы волочения, можем определить высоту призмы на текущем шаге расчета. Считаем, что подвижным является поток, который формируется во время процесса копания. Он определяется толщиной стружки и углом большого сдвига  $\varphi$ . Тогда, задаваясь шагом разбивки подвижного потока на сегменты, выделяем их в потоке грунта (рис. 3). В данном случае каждый сегмент ограничивается точ-

ками  $Z_i, Z_{i+1}, D_{i+1}, D_i$  для верхнего сегмента и  $Z_{i-1}, Z_i, D_i, D_{i-1}$  – для нижнего. Радиус потока  $R_{\Pi}$  определяется исходя из толщины стружки и угла наклона большого сдвига как  $R_{\Pi} = R - \frac{h}{\sin(\varphi)}$ . Тогда для определения усилий, действующих на элемент потока, необходимо рассмотреть каждый из элементов в состоянии равновесия.

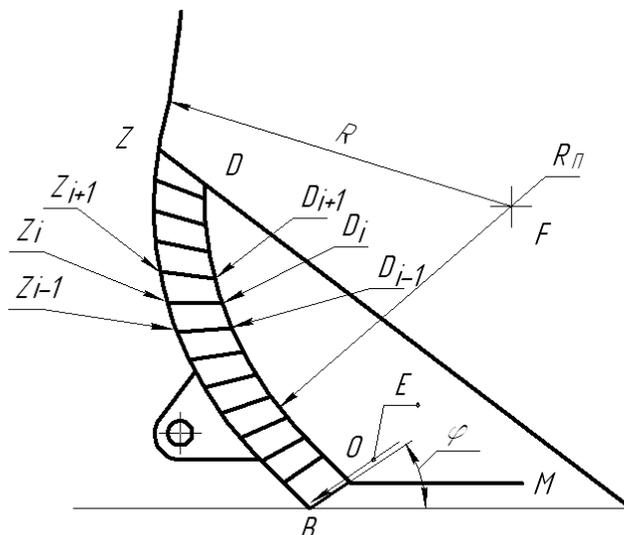


Рис. 3. Призма волочения с разбивкой на элементы подвижного потока

Выделим из потока  $i$ -й элемент и рассмотрим приложенные к нему силы (рис. 4).

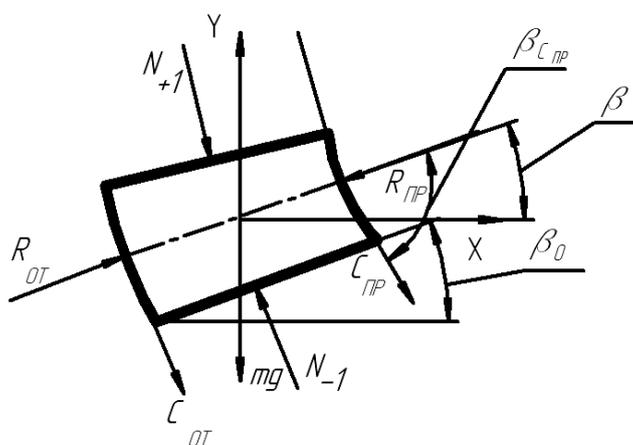


Рис. 4. Сегмент подвижного потока

На каждый элемент, кроме первого, действует нормальная сила от верхнего элемента, которая определяется следующим образом:

$$N_{-1} = \frac{m \cdot g \cdot \sin(\beta_{C_{\Pi P}} + \omega) + R_{\Pi P} \cdot \sin(\omega + \rho) + (C_{\Pi P} + N_{+1}^i) \cdot \cos(\omega)}{\cos(\beta_0 - \beta_0^{i-1} + \omega)},$$

где  $m$  – масса сегмента грунта;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\beta_{C_{\Pi P}}, \beta_0$  – углы в соответствии с рисунком 4;  $\omega$  – угол трения грунта по металлу;  $N_{+1}^i$  – нормальное усилие воздействия от предыдущего сегмента;  $\beta_0^{i-1}$  – угол в соответствии со схемой для предыдущего сегмента. Величина  $C_{\Pi P}$  определяется как

$$C_{\Pi P} = h_{\Pi P} \cdot C_r \cdot B.$$

Здесь  $h_{\Pi P}$  – высота выделенного сегмента в подвижном потоке призмы волочения;  $C_r$  – коэффициент остаточного сцепления грунта;  $B$  – ширина отвала.

Далее определим проекции силы  $C_{ПП}$  на оси абсцисс и ординат:

$$C_{ПП}^x = C_{ПП} \cos(\beta_{C_{ПП}});$$

$$C_{ПП}^y = C_{ПП} \sin(\beta_{C_{ПП}}).$$

Величина  $R_{ПП}$  определяется по формуле:

$$R_{ПП} = \frac{m \cdot g \cdot \sin(\rho) + C_{ПП}^x \cdot \sin(\rho) + C_{ПП}^y \cdot \cos(\rho)}{\cos(\gamma_{ПП} - \rho)},$$

где  $\gamma_{ПП}$  – угол наклона отрезка между точкой  $M$  (см. рис. 3) и центром рассматриваемого сегмента.

Затем можно определить силу воздействия каждого сегмента на отвал:

$$R_{OT} = \frac{R_{ПП} \cdot \sin(\beta_{C_{ПП}}) + (C_{ПП} + N_{+1}) \sin(\beta_{C_{ПП}}) + N_{-1} \cdot \sin(\beta_{C_{ПП}}^{-1})}{\sin(\beta_0 + \omega)}.$$

Для дальнейших расчетов определяем горизонтальную и вертикальную составляющие силы  $R_{OT}$ :

$$R_{OT}^x = R_{OT} \cdot \cos(\beta_0);$$

$$R_{OT}^y = R_{OT} \cdot \sin(\beta_0).$$

Сумма всех сил, создаваемых воздействием сегментов на отвал с учетом угла  $\beta_0$ , сформирует результирующие усилия от воздействия призмы волочения в горизонтальном и вертикальном направлении (см. рис. 4).

Основные усилия при копании возникают при отделении стружки от основного грунта и определяются углом наклона  $\varphi$  площадки большого сдвига (см. рис. 3). Для определения этого угла необходимо найти давление от призмы волочения на площадку  $OM$ , которое препятствует разрушению грунта:

$$P = \frac{-R_{OD} \cdot \cos(\gamma_R) + C_{ПП}^x}{\sin(\rho)}.$$

Здесь

$$R_{OD} = \frac{m_{ПП} \cdot g \cdot \sin(\rho) + C_{ПП}^x \cdot \cos(\rho) + C_{ПП}^y \cdot \sin(\rho)}{\cos(\gamma_R - \rho)},$$

где  $m_{ПП}$  – масса призмы волочения.

Угол  $\gamma_R$  определяется как

$$\gamma_R = \arctan\left(\frac{Z_Y^{i\max} - B_Y}{B_X - Z_X^{i\max}}\right).$$

Здесь  $Z_Y^{i\max}$ ,  $Z_X^{i\max}$  – координаты точки соприкосновения верхнего сегмента призмы волочения и профиля отвала соответственно.

Предполагая, что отделение стружки от массива грунта в данном случае происходит под принятым углом  $\varphi$ , можем определить значение силы  $E$  (см. рис. 3), направленной вдоль площадки сдвига. Учитывая, что в момент сдвига это значение будет максимальным, определяем его по зависимости:

$$E_{\max} = \frac{m^0 \cdot g \cdot \sin(\alpha + \omega) + R_{OT}^0 \sin(\omega + \rho) - C_{OB} \cos(\alpha + \omega + \varphi) + C_{ПП}^0 + N^0 \cos(\omega)}{\sin(\alpha + \omega + \varphi)},$$

где переменные с верхним индексом «0» относятся к нижнему (нулевому) сегменту призмы волочения;  $\alpha$  – угол резания;  $C_{OB} = l_{OB} \cdot B \cdot C$  ( $l_{OB}$  – длина площадки  $OB$ ;  $C$  – коэффициент удельного сцепления грунта ненарушенной структуры).

Зная значение силы  $E_{\max}$ , можем определить давление на участок  $OB$  от призмы волочения по формуле:

$$Q_{\max} = \frac{E_{\max}}{B \cdot l_{OB} + C \sin(\rho)},$$

где  $l_{OB}$  – длина площадки  $OB$ .

Затем необходимо определить предельное давление, которое может выдержать грунт со стороны отвала без разрушения. Это давление в соответствии с методикой [2] определяется как

$$Q_{пред} = \frac{\Delta l \cdot \sin(\Delta + \Lambda)}{\sin(\Delta) \cdot e^{(2 \cdot \tan(\rho))}},$$

где  $\rho$  – угол внутреннего трения грунта;

$$\Delta l = \frac{P \cdot \sin(\Delta)}{\sin(\Delta_1 - \Lambda_1)}.$$

Здесь

$$\Delta = \frac{\arcsin(\Lambda_1)}{\sin(\rho)};$$

$$\Lambda_1 = \frac{\arcsin(P \cdot \sin(\rho))}{P \cdot \cos(\rho)} + \frac{c}{\tan(\rho)},$$

где  $c$  – силы сцепления грунта ненарушенной структуры;  $P$  – давление от призмы волочения на участок  $OM$ .

$$\Delta_1 = \arcsin\left(\sin\left(\frac{\Lambda_1}{\sin(\rho)}\right)\right)$$

для грунтов с горизонтальным основанием.

Для определения величины  $P$  необходимо рассчитать параметры самой призмы волочения для заданного угла наклона площадки большого сдвига. В связи с тем, что расчет необходимо производить итерационным способом, необходимо на каждом шаге определять объем призмы волочения или для принятой плоской модели – площадь призмы волочения.

Определив величину предполагаемого давления на площадку сдвига от призмы волочения, вычислим действительный угол сдвига по зависимости:

$$\varphi_1 = \frac{-\frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2} + \ln\left(\frac{Q_{\max}(1 - \sin(\rho))}{P_1 \cos(\rho)}\right)}{2 \tan(\rho)},$$

где  $P_1$  определяется по формуле:

$$P_1 = \sqrt{(P_{OI} \sin(\rho))^2 + \left(P_{OI} \cos(\rho) + \frac{C}{\tan(\rho)}\right)^2}.$$

Здесь

$$P_{OI} = \frac{2P}{B(M_x - O_x)},$$

где  $M_x$ ,  $O_x$  – координаты точек  $M$  и  $O$  по оси абсцисс.

Определив действительное значение угла большого сдвига, сравниваем его с ранее принятым, и в том случае если значения не отклоняются друг от друга на величину, более заданной погрешности, применяем для дальнейших расчетов принятое значение и рассчитанные усилия. В том случае, когда действительное значение угла большого сдвига отличается от принятого на величину, более чем заданная погрешность, необходимо откорректировать принятое значение в большую, либо меньшую сторону и по-

вторить расчет. При удовлетворительном рассчитанном значении угла  $\varphi$  принимаем для дальнейших расчетов определенные силовые параметры, наиболее важным в данном случае является сила  $E_{\max}$ , значение которой определяет величину усилия воздействия разрабатываемого грунта на отвал в момент большого сдвига. В зависимости от высоты призмы волочения на отвал воздействует сила  $R_{от}$ , величина этой силы увеличивается практически линейно в зависимости от роста высоты призмы волочения.

Приведенная выше методика предназначена для реализации на ЭВМ, так как в процессе расчета требуется применение специальных алгоритмов для реализации циклических вычислений, а также поиска значений методом последовательных приближений с переменным шагом и изменением направления движения.

Описанный метод расчета в совокупности с параметрами рабочего оборудования бульдозера реализован в виде программного обеспечения на ЭВМ, где рабочее оборудование бульдозера представлено как набор библиотек, отдельных элементов ОТВАЛ, РАМА, ГИДРОЦИЛИНДР, ГРУНТ. Данное программное обеспечение позволяет пользователю оперативно изменять параметры рабочего оборудования и анализировать полученные результаты, представляемые в виде текстовой либо графической информации.

Адекватность результатов расчетов проверена при помощи программы «ОТРА» [2]. Проверка показала хорошую сходимость. Основным отличием предлагаемой методики является использование библиотечных элементов в разработанном программном обеспечении, что существенно сокращает время на ввод исходных данных. Процесс расчета автоматизирован таким образом, что имитирует работу копания рабочим оборудованием бульдозера с выполнением операций заглабления и выглабления отвала по желанию пользователя. С помощью специального графического модуля программное обеспечение предлагает пользователю возможность визуального анализа информации о процессе копания с использованием элементов масштабирования. Информация о величинах усилий на отвале может представляться в текстовом и графическом виде, что позволяет оценивать динамику усилий в процессе копания. Предлагаемое программное обеспечение может быть встроено в программные продукты, позволяющие определять основные параметры гусеничной машины и, таким образом, может использоваться для определения основных параметров гусеничных машин, являющихся базой для бульдозеров [3]. Такой подход позволит на стадии проектирования выявить наиболее грубые ошибки при принятии компоновочных решений.

**Выводы.** Предлагаемая методика и созданный на ее основании программный продукт могут быть использованы при проектировании рабочего оборудования бульдозера с целью предварительного выбора его основных параметров. Значения усилий на рабочем оборудовании, определяемые на стадии проектирования, дают информацию для проведения оптимизационных работ с целью выбора наилучших параметров рабочего оборудования и машины в целом в зависимости от ее назначения.

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.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник конструктора дорожных машин – 2-е изд., переработ. и доп. / И.П. Бородачев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1973. – 504 с.
2. Берестов, Е.И. Научные основы моделирования системы «Грунт – рабочее оборудование землеройных машин» в режиме послыной разработки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Е.И. Берестов. – Могилев, 1998. – 48 с.
3. Лесковец, И.В. Математическая модель гусеничного движителя СДМ / И.В. Лесковец // Вестн. Могилев. гос. техн. ун-та. – 2003. – № 2. – С. 83 – 87.

*Поступила 15.10.2008*