

РЕЗАНИЕ ГРУНТА НОЖОМ  
С АНТИФРИКЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ

Е.И. БЕРЕСТОВ - д-р техн. наук, проф.,  
А.Х. АФХАМИ АЛИШАХ, Э.Х. ДЖАЛИЛВАНД  
Могилев, Беларусь

Вопросам энергосбережения при производстве земляных работ уделялось и уделяется большое внимание как в прошлом, так и в настоящее время. Снижение энергозатрат при копании грунта землеройными машинами ведется по нескольким направлениям, одним из которых является уменьшение трения между грунтом и поверхностью рабочего органа. Для этой цели использовались и физические эффекты типа электроосмоса, и подача сжатого воздуха в зону резания, и применение вибрации. Между тем снизить трение между грунтом и рабочим органом можно и самым простым способом – нанесением на поверхность рабочего органа антифрикционного покрытия.

Анализ литературных источников, включая и патентные материалы, позволяет заключить, что несмотря на огромный накопленный материал, нельзя считать исследования в этой области завершенными. Это подтверждается и тем, что в настоящее время увеличивается объем публикаций по проблемам снижения трения о грунт за счет поверхностных покрытий в других областях строительства – при погружении в грунт свай, колец и других объектов, а также в других областях техники.

Для оценки эффективности применяемого способа снижения сил трения необходимо иметь метод расчета, позволяющий всесторонне проанализировать его как с точки зрения снижения сопротивлений, так и общего влияния на процесс отделения стружки, под которым понимается характер изменения не только силовых параметров, но и геометрических – угла сдвига, размеров потока срезанного грунта, перемещаемого по поверхности рабочего органа и др. Особенно это важно при применении антифрикционных покрытий, поскольку они могут иметь относительно высокую стоимость.

Рассмотрим установившийся процесс резания грунта прямым острым ножом. Учитывая, что рабочая поверхность ножа может иметь несколько слоев антифрикционного покрытия по длине ножа, причем каждый слой может иметь свой коэффициент трения, общую расчетную схему представим в виде, изображенном на рисунке 1. Такая схема содержит три элемента грунта, каждый из которых имеет свои особенности расчета, свой коэффициент трения с грунтом и свою длину –  $l_1$ ,  $l_2$  и  $l_3$ . Зададимся величиной угла сдвига  $\psi$ . Из схемы видно, что в этом случае толщина  $h_1$  грунта, перемещаемого по ножу, будет равна

$$h_1 = h \frac{\sin(\alpha + \psi)}{\sin \psi},$$

где  $\alpha$  – угол резания;  $h$  – толщина срезаемой стружки.

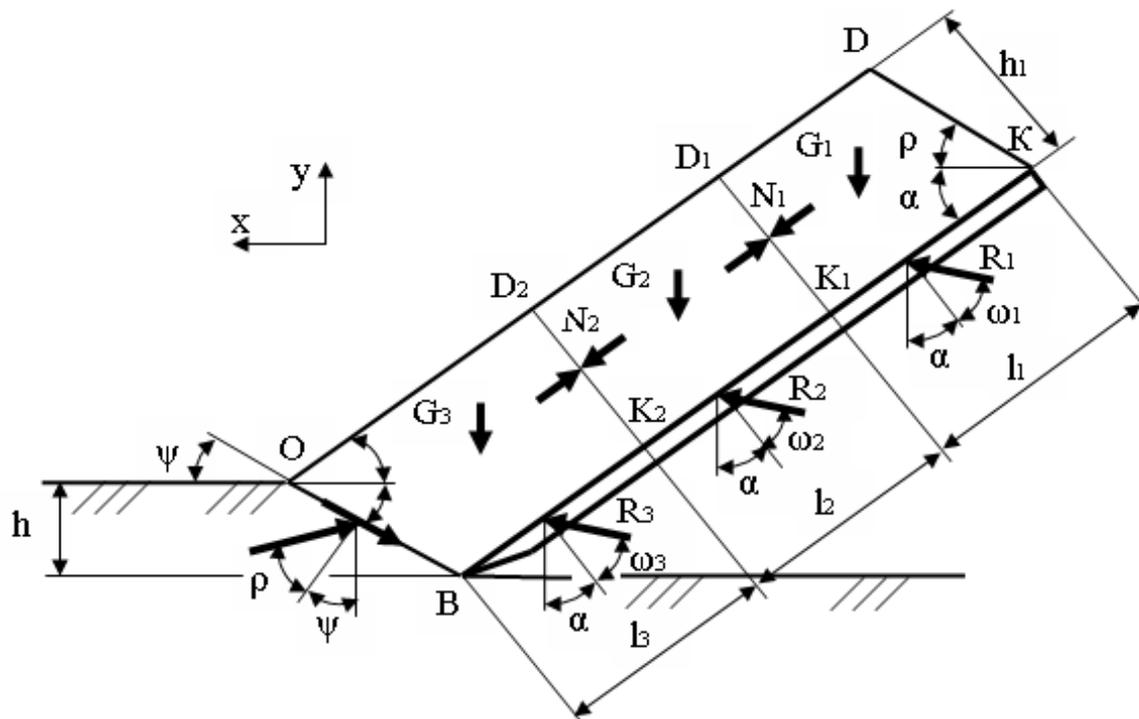


Рис. 1. Общая расчетная схема.

Рассмотрим верхний элемент грунта  $D_1K_1KD$ , грань  $DK$  которого наклонена к горизонту под углом внутреннего трения  $\rho$ , а отрезок  $D_1K_1$  перпендикулярен поверхности ножа. Перемещение рассматриваемого элемента по ножу осуществляется под действием силы  $N_1$  со стороны нижележащего среднего элемента. Со стороны ножа на выделенный элемент грунта действует сила  $R_1$ , отклоненная от нормали к поверхности ножа под углом внешнего трения покрытия этого участка о грунт  $\omega_1$ . Кроме этих сил на выделенный элемент действует и собственный вес  $G_1$ . Найдем его.

Боковая поверхность верхнего элемента  $S_1$  имеет форму трапеции, и ее площадь будет равна

$$S_1 = h_1 \left( \frac{l_1 + (l_1 - l_{DD_0})}{2} \right) = h_1 \left( l_1 - 0,5 \frac{h_1}{\operatorname{tg}(\alpha + \rho)} \right).$$

Вес верхнего элемента грунта определится по формуле

$$G_1 = S_1 B \rho g,$$

где  $B$  – ширина ножа;  $\rho$  – плотность грунта;  $g$  – гравитационное ускорение.

Неизвестные силы  $N_1$  и  $R_1$  можно найти из условий равновесия верхнего элемента, проектируя все силы на оси  $X$  и  $Y$ :

$$N_1 = G_1 \frac{\sin(\alpha + \omega_1)}{\cos \omega_1}; \quad R_1 = N_1 \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_1)}.$$

Промежуточный элемент грунта  $D_2K_2K_1D_1$  отделен от нижнего гранью  $D_2K_2$ , параллельной грани  $D_1K_1$ . Вес промежуточного элемента равен

$$G_2 = h_1 l_2 B \rho_2 g.$$

Неизвестные силы  $N_2$  и  $R_2$ , аналогичные силам  $N_1$  и  $R_1$ , найдутся тем же способом

$$N_2 = G_2 \frac{\sin(\alpha + \omega_2)}{\cos \omega_2} + N_1; R_2 = (N_2 - N_1) \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_2)},$$

где  $\omega_2$  - угол внешнего трения покрытия участка  $K_2K_1$  о грунт.

Отметим, что при большем количестве слоев покрытия метод расчета каждого дополнительного элемента грунта, расположенного между верхним и нижним элементами, не имеет существенных отличий по сравнению с промежуточным элементом  $D_2K_2K_1D_1$ .

Расчет нижнего элемента грунта  $OBK_2D_2$  имеет присущие ему особенности. Нижняя грань  $OB$  элемента, являющаяся площадкой скольжения, наклонена к горизонту под углом сдвига  $\psi$ .

Площадь боковой поверхности  $OBK_2D_2$  этого элемента будет равна

$$S_3 = h_1 \left( \frac{l_3 + (l_3 + l_{OD_3})}{2} \right) = h_1 \left( l_3 + 0,5 \frac{h_1}{\operatorname{tg}(\alpha + \psi)} \right).$$

Вес нижнего элемента грунта определится из формулы

$$G_3 = S_3 B \rho g.$$

Сила  $C_{OB}$ , затрачиваемая на преодоление сцепления по площадке сдвига  $OB$ , зависит от площади  $S_{OB}$  поверхности этой площадки и удельного сцепления грунта и будет равна

$$C_{OB} = S_{OB} c = \frac{Bch}{\sin \psi},$$

где  $c$  – удельное сцепление грунта ненарушенной структуры.

Оставшиеся неизвестные значения сил  $E$  и  $R_3$  можно найти из двух уравнений, представляющих собой проекции всех сил на оси  $X$  и  $Y$ . В итоге получим

$$E = \frac{G_3 \sin(\alpha + \omega_3) - C_{OB} \cos(\alpha + \omega_3 + \psi) + N_2 \cos \omega_3}{\sin(\alpha + \omega_3 + \psi + \rho)}; \quad (1)$$

$$R_3 = \frac{E \sin(\psi + \rho) + C_{OB} \cos \psi - N_2 \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_3)}, \quad (2)$$

где  $\omega_3$  - угол внешнего трения грунта о третий слой покрытия ножа на участке  $BK_2$ .

Таким образом, получены уравнения, позволяющие определить все силы, действующие на выделенные элементы грунта, перемещающиеся по поверхности ножа по участкам с разным коэффициентом трения. Эти силы определены в функции от угла сдвига  $\psi$ , на данном этапе расчета неизвестного. Для определения его величины используем метод расчета [ ], позволяющий по граничным условиям на поверхности разрабатываемого грунта и площадке сдвига  $OB$  найти его величину.

На поверхности разрабатываемого грунта, свободной от внешнего воздействия при отсутствии призмы волочения, приведенное давление равно давлению связности

$$H = \frac{c}{\operatorname{tg} \rho}, \quad (3)$$

которое действует нормально поверхности.

Граничные условия на площадке сдвига  $OB$  будем определять непосредственно в момент сдвига, так как установлено [ ], что устойчивость этой площадки будет минимальной именно в момент сдвига, при этом приведенное давление  $q$ , действующее в момент сдвига на площадку  $OB$ , будет равно

$$q = \frac{E}{Bh} \sin \psi + \frac{c}{\sin \rho}. \quad (4)$$

Угол отклонения  $\delta$  этого давления от нормали к поверхности в момент сдвига равен углу внутреннего трения грунта  $\rho$ .

По известным граничным условиям (3) и (4) можно найти величину угла сдвига.

При выполнении условия

$$q \geq H \frac{\cos \rho}{1 - \sin \rho}, \quad (5)$$

угол сдвига определяется по формуле

$$\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} - \frac{\ln A}{2 \operatorname{tg} \rho}, \quad (6)$$

где  $A = \frac{q}{H} \frac{1 - \sin \rho}{\cos \rho}$ .

Если условие (5) не выполняется, то

$$\psi = \frac{3}{4} \pi - \frac{\rho}{2} + \Delta_p, \quad (7)$$

где  $\Delta_p = \arcsin \frac{\sin \delta_p}{\sin \rho}$ ;  $\delta_p = -\arccos \left( \frac{\cos \rho}{2} \frac{1 + A}{\sqrt{A}} \right)$ ,

а  $\delta_p$  – угол отклонения приведенного давления на линии разрыва, появляющейся в рассматриваемом случае в зоне разрушения грунта.

Таким образом, в зависимости от выполнения условия (5), решая совместно уравнение (4) с уравнениями (6) или (7), можно найти искомую величину угла сдвига.

После определения угла сдвига становятся известными значения не только сил, изображенных на рисунке 1, но и всех геометрических параметров, характеризующих процесс резания грунта ножом с антифрикционным покрытием.

Определим касательную и нормальную составляющие силы сопротивления резанию, используя схему, изображенную на рисунке 1. Силы, действующие со стороны грунта на участки ножа, равны и противоположно направлены силам  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , изображенным на этом рисунке.

Касательная составляющая сопротивления резанию, действующая непосредственно в момент сдвига, в соответствии со схемой определится так

$$P_1^{\max} = R_1 \sin(\alpha + \omega_1) + R_2 \sin(\alpha + \omega_2) + R_3 \sin(\alpha + \omega_3).$$

Аналогичным образом получим и значение нормальной составляющей сопротивления резанию

$$P_2^{\max} = R_1 \cos(\alpha + \omega_1) + R_2 \cos(\alpha + \omega_2) + R_3 \cos(\alpha + \omega_3).$$

Сразу после сдвига сопротивление резанию уменьшится за счет разрушения сцепления по поверхности площадки сдвига.

При  $c=0$  уравнения (1) и (2) примут вид

$$E_{\min} = \frac{G_3 \sin(\alpha + \omega_3) + N_2 \cos \omega_3}{\sin(\alpha + \omega_3 + \psi + \rho)};$$

$$R_3^{\min} = \frac{E_{\min} \sin(\psi + \rho) - N_2 \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_3)}.$$

Так как значения сил  $R_1$  и  $R_2$  не изменятся, величина составляющих сопротивления резанию непосредственно после сдвига станет равной

$$P_1^{\min} = R_1 \sin(\alpha + \omega_1) + R_2 \sin(\alpha + \omega_2) + R_3^{\min} \sin(\alpha + \omega_3);$$

$$P_2^{\min} = R_1 \cos(\alpha + \omega_1) + R_2 \cos(\alpha + \omega_2) + R_3^{\min} \cos(\alpha + \omega_3).$$

Таким образом, изложенный метод расчета обеспечивает проведение аналитических исследований с целью изучения влияния параметров антифрикционных покрытий на величины, характеризующие процесс резания, как геометрические, так и силовые. При этом необходимо иметь ввиду ограничения на длину нижнего слоя антифрикционного покрытия, присущие этому методу. Эти ограничения вытекают из его физической сути.

Уравнения, позволяющие рассчитать силовые параметры для верхнего и нижнего элементов грунта отражают физическую сущность перемещения этих элементов по соответствующим участкам ножа под действием сил, действующих со стороны нижележащих участков.

Аналогичные уравнения для нижнего элемента вытекают из второй фазы разрушения грунта [ ], при которой в момент его разрушения происходит переформирование первичной площадки скольжения LMB (рис. 2). При этом процесс последовательного разрушения грунта (вторая фаза разрушения) продолжается до тех пор, пока сдвиг не произойдет под углом  $\psi$ , обеспечивающим устойчивость откоса массива от дальнейшего разрушения при значительном его спрямлении за счет перераспределения давлений при разной крутизне участков первичной площадки скольжения LMB. Вновь сформированную площадку скольжения ОВ можно считать прямолинейной. Аналогичные процессы происходят и при малых сдвигах (положения ножа II и III на рис. 2), при которых происходит формирование площадок скольжения, расположенных под углами  $\psi_1$  и  $\psi_2$ .

В первом приближении можно принять, что нижний участок с антифрикционным покрытием должен выходить на поверхность разрабатываемого грунта, то есть, его длина должна определяться из условия

$$l_3 \geq \frac{h}{\sin \alpha}.$$

Это вытекает из того, что именно этот участок ВК совместно с площадкой сдвига ОВ образуют две грани, осуществляющие выклинивание грунта при его разрушении из зоны резания и перемещение его по поверхности ножа.

Однако из анализа рисунка 2 можно сделать заключение, что длина нижнего участка может быть и меньшей, но она не должна быть меньше длины отрезка ВВ<sub>1</sub>, расположенной между площадками скольжения двух соседних больших сдвигов, поскольку положение начальной площадки большого

сдвига  $O_1B_1$  как раз и разделяет массу грунта, перемещаемую по ножу, на две части. Применительно к верхней части применимы уравнения, позволяющие рассчитать силовые параметры для верхнего и нижнего элементов грунта. Для части ножа  $BB_1$  необходимо использовать только те уравнения, которые позволяют рассчитать силовые параметры для нижнего элемента грунта.

Если возникнет необходимость использовать для нижнего участка ножа  $BB_1$  разные слои антифрикционного покрытия, то необходимо прибегать к методам расчета [ ], рассматривающих весь цикл разрушения грунта ножом между двумя соседними большими сдвигами, на основании которого и построен рисунок 2.

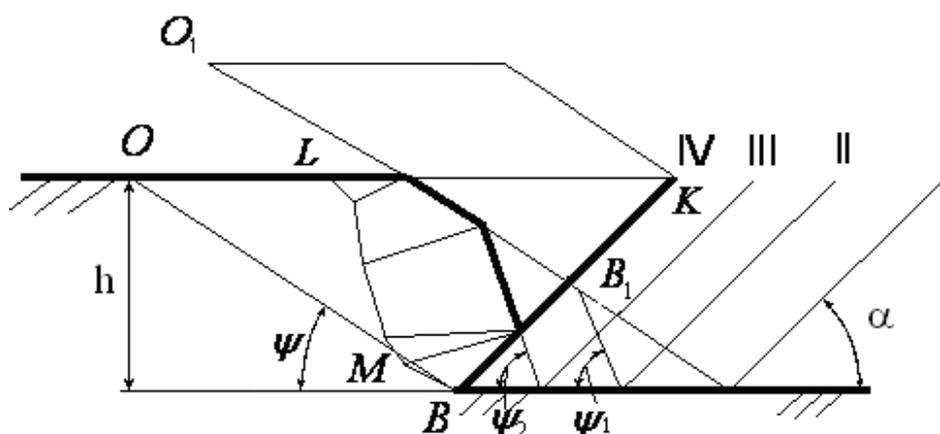


Рис. 2. Схема разрушения грунта при его взаимодействии с ножом.

Приведем результаты исследований (рис.3), полученные по изложенной методике применительно к ножу с размерами 100x150 мм, режущему грунт при толщине стружки 2 см при установке под углами резания 30 и 60 градусов. Рассматривался нож с покрытием, длина которого  $l$  изменялась от максимально возможной (при полном покрытии ножа) до минимальной. Для определения минимальной длины нижнего участка использовался метод расчета, рассматривающий весь цикл разрушения грунта.

Физико-механические свойства грунта соответствуют грунту в грунто-вом канале: угол внутреннего трения  $28^\circ$ , удельное сцепление 4 кПа, плотность  $1,6 \text{ кг/дм}^3$ . Угол внешнего трения для ножа без покрытия принимался равным  $28^\circ$ , с покрытием –  $20^\circ$ .

Анализ результатов, приведенных на рис. 3, показывает, что наиболее эффективным в рассматриваемых условиях будет нанесение антифрикционного покрытия непосредственно у режущей кромки ножа (минимальная длина покрытия должна быть не менее длины отрезка  $BB_1$  на рис.2). При выполнении этого условия максимальное значение касательной составляющей сопротивления копанию снижается примерно на 14% для ножа с углом резания  $30^\circ$ , и на 17% для ножа с углом резания  $60^\circ$ .

Если всю поверхность ножа покрыть антифрикционным покрытием, то снижение этой же силы составит лишь около 19% для этих же условий резания.

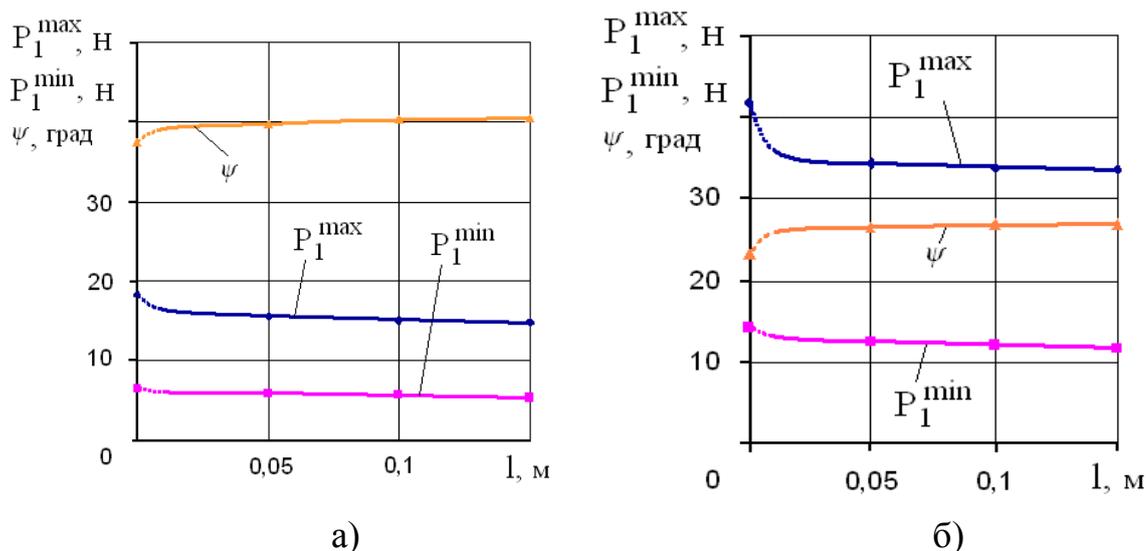


Рис. 3. Результаты исследований при резании грунта ножом, установленным под углом  $30^\circ$  (а) и  $60^\circ$  (б).

Показательно, что при этом длина антифрикционного слоя увеличивается в 15 раз, поскольку расчеты всего цикла разрушения показывают, что минимальная длина покрытия при угле резания  $30^\circ$  составляет 11 мм, при угле резания  $60^\circ$  – 9 мм, а длина всего ножа равна 150 мм. Следовательно, учитывая относительную дороговизну антифрикционных покрытий, полученные результаты позволяют более обоснованно подойти к выбору расчетной длины покрытия с учетом допустимой степени износа ножей.

Безусловно, полученные результаты нельзя автоматически переносить на процесс копания, поскольку при копании отвалом или ковшом сопротивление перемещению срезанного грунта, движущегося по поверхности отвала или сквозь грунт внутри ковша по мере их наполнения грунтом будет играть все более существенную роль.

На основании приведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Одним из перспективных направлений совершенствования режущих элементов рабочих органов землеройных машин является покрытие их режущей части современными прочными антифрикционными материалами.
2. Для расчета параметров резания грунта таким ножом и выбора рациональной длины такого покрытия можно использовать программное обеспечение, выполняющее расчеты по приведенной методике.
3. Для использования разработанных принципов расчета применительно к процессам копания отвальным и ковшовым рабочими органами необходимо их доработать применительно к особенностям этих процессов и, в первую очередь, уточнить влияние дополнительных факторов, оказывающих воздействие на перемещаемый поток грунта.