

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ МАШИН ДЛЯ ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТ

Е.И. БЕРЕСТОВ - д-р техн. наук, проф.,
А.Х. АФХАМИ АЛИШАХ, аспирант
(Белорусско-Российский университет, г. Могилев)

Снижение сопротивления грунта при его разработке землеройными машинами является важной задачей вследствие значительной энергоемкости этого процесса и больших объемов работ, имеющих тенденцию увеличиваться. Эта работа ведется по нескольким направлениям, одним из которых является уменьшение трения поверхности рабочего органа о грунт. Влияние этого трения на сопротивление грунта аналогично влиянию геометрических параметров рабочего органа [1].

Снизить трение между грунтом и рабочим органом можно относительно простыми способами – наплавкой прочных материалов с низким коэффициентом трения, правильной термообработкой трущихся поверхностей [2] а так же нанесением на поверхность рабочего органа антифрикционного покрытия.

Для оценки эффективности применяемого способа снижения сил трения необходимо иметь метод расчета, позволяющий всесторонне проанализировать его с точки зрения снижения сопротивлений, обеспечивающий выбор рациональных параметров антифрикционной зоны. Это особенно важно при применении антифрикционных покрытий, поскольку они могут иметь относительно высокую стоимость. Такой способ [3] разработан применительно к резанию грунта ножами. Адаптацию этого метода применительно к процессу копания машинами с отвальным или ковшовым рабочим органом рассмотрим на примере копания плоским рабочим органом с призмой волочения.

Призма волочения MOD (рис. 1) находится перед ножом и перемещается по поверхности разрабатываемого грунта. Она появляется в том случае, когда угол резания α превышает угол естественного откоса ε , который обычно принимается равным углу внутреннего трения ρ . Рассмотрим условия ее равновесия. На эту призму, кроме ее собственного веса $G_{пр}$, со стороны поверхности разрабатываемого грунта MO действует сила S , а со стороны перемещаемого по ножу потока грунта OBKD – сила T . Эти силы отклонены от нормали к соответствующим площадкам скольжения на угол внутреннего трения ρ . На площадке OD дополнительно действует сила от восстановившегося сцепления C_{OD}

$$C_{OD} = c_p l_{OD} B,$$

где c_p – удельное восстановившееся сцепление грунта; l_{OD} – длина площадки OD, B – ширина рабочего органа.

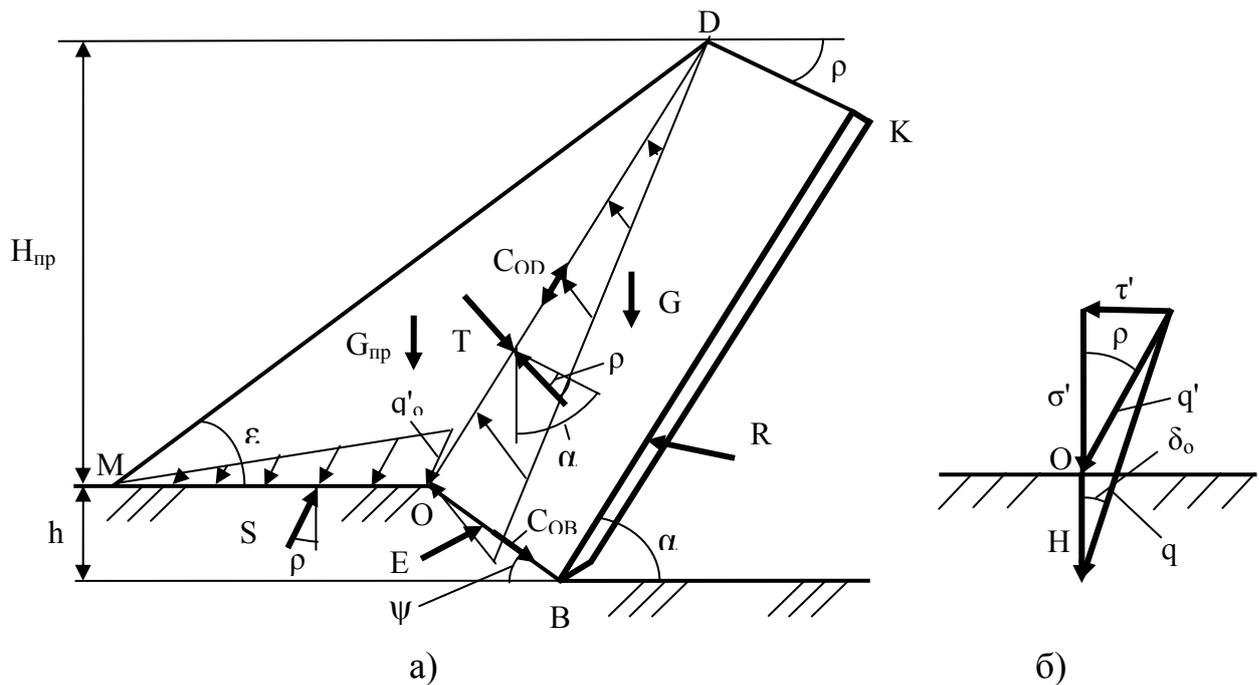


Рис. 1. Схема копания плоским рабочим органом с призмой волочения (а) и расчета граничных условий на поверхности разрабатываемого грунта в т. О (б).

Вес призмы волочения будет равен

$$G_{np} = S_{np} B \rho_g g,$$

где ρ_g – плотность грунта в призме волочения; g – гравитационное ускорение; S_{np} - площадь боковой поверхности MOD призмы волочения, равная

$$S_{np} = \frac{l_{MO} H_{np}}{2},$$

где H_{np} и l_{np} – соответственно высота и длина основания МО призмы волочения, которые можно увязать с геометрическими размерами грунта, перемещаемого по ножу, следующим образом

$$H_{np} = l_{OD} \sin \alpha, \quad l_{MO} = H_{np} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \varepsilon} - \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \right).$$

Неизвестные силы S и T определим [], проектируя все силы, действующие на призму волочения, на оси X и Y

$$\Sigma X = -S \sin \rho + T \sin(\alpha - \rho) - C_{OD} \cos \alpha = 0;$$

$$\Sigma Y = S \cos \rho - G_{np} + T \cos(\alpha - \rho) + C_{OD} \sin \alpha = 0.$$

Из первого уравнения можно получить, что

$$S = T \frac{\sin(\alpha - \rho)}{\sin \rho} - C_{OD} \frac{\cos \alpha}{\sin \rho}.$$

А с учетом этого значения из второго уравнения получим

$$T = G_{np} \frac{\sin \rho}{\sin \alpha} + C_{OD} \frac{\cos(\alpha + \rho)}{\sin \alpha}.$$

При расчете угла сдвига [] за граничные условия достаточно принять граничные условия на рассматриваемой поверхности в т. О, в которой площадка сдвига выходит на поверхность.

Исходя из расчетной схемы (рис. 1,а) естественно предположить, что эпюра давлений на площадку скольжения МО является треугольной. В этом случае справедливо соотношение

$$S = \frac{q'_o}{2} l_{MO} B.$$

Из этого соотношения можно найти величину действительного давления q'_o , действующего на поверхность грунта в т. О

$$q'_o = \frac{2S}{l_{MO} B}.$$

Значение приведенного давления q_o и угла его отклонения δ_o в рассматриваемой точке О можно найти из схемы, изображенной на рис. 1,б. Из этой схемы можно получить, что

$$q_o = \sqrt{(\tau')^2 + (\sigma' + H)^2} = \sqrt{(q'_o \sin \rho)^2 + (q'_o \cos \rho + H)^2},$$

а также, что

$$\delta_o = \arctg \frac{\tau'}{\sigma' + H} = \frac{q'_o \sin \rho}{q'_o \cos \rho + H}.$$

Таким образом, известны значения приведенного давления q_o и угла его отклонения от нормали к разрабатываемой поверхности грунта в т. О выхода площадки сдвига на поверхность грунта.

Для дальнейших расчетов принимаем, что распределение давлений вдоль площадки скольжения ОД является квазистатическим. Такое допущение в механике грунтов считается общепринятым []. Оно приводит к треугольной эпюре распределения давлений, возникающих на площадке скольжения ОД от силы Т (рис. 1,а).

Тогда давление в т. О, действующее на площадку скольжения ОД, будет равно

$$q''_o = \frac{2T}{l_{OD} B}.$$

Теперь можно перейти к копанию грунта плоским рабочим органом с антифрикционным покрытием. Такое покрытие может быть нанесено на отдельный участок рабочего органа ввиду его относительной дороговизны. Кроме этого участков с разным коэффициентом трения по длине ножа может быть несколько не только из-за антифрикционных покрытий, но и из-за разной термообработки [].

Учитывая это, общую расчетную схему представим в виде, изображенном на рис. 3. Такая схема содержит три участка ножа с разным коэффициентом трения $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ и соответственно три элемента перемещаемого по ножу грунта, каждый из которых имеет свои особенности расчета.

Определим величину давления q'' в узловых точках D_2 и D_1 (рис. 2).

Давление в т. D_2 будет равно

$$q''_{D_2} = q''_o \frac{l_{D_2 D_1} + l_{D_1 D}}{l_{OD}},$$

где $l_{D_2 D_1}, l_{D_1 D}, l_{OD}$ – длины соответствующих отрезков.

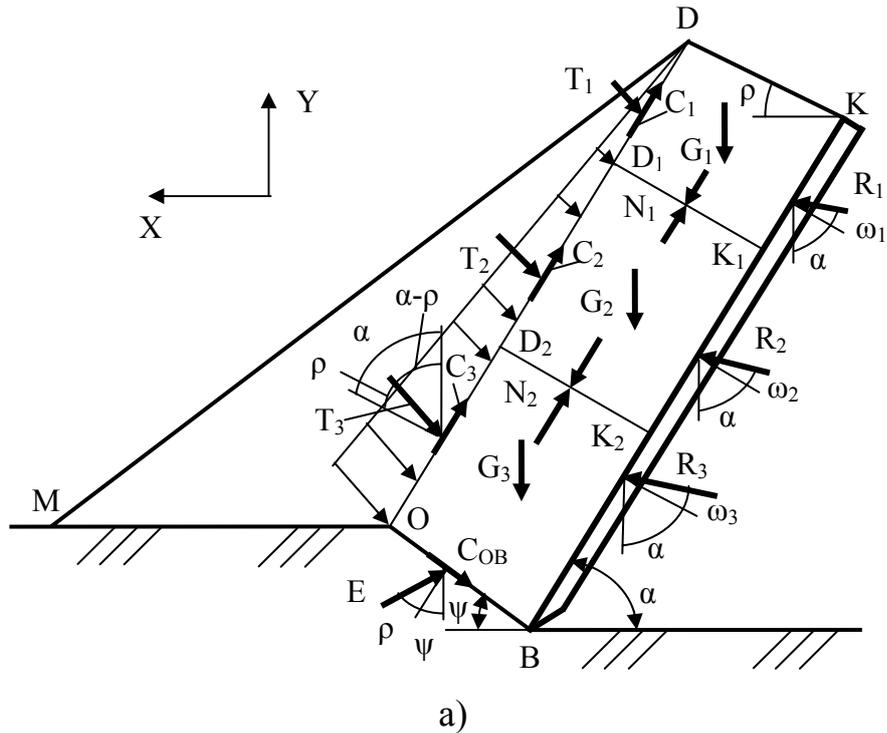


Рис. 2. Схема для расчета сопротивлений копанию плоским рабочим органом с призмой волочения.

Аналогичным образом найдем давление в т. D_1

$$q''_{D_1} = q''_o \frac{l_{D_1D}}{l_{OD}}.$$

Тогда значения сил T_1 , T_2 и T_3 , действующих со стороны призмы волочения соответственно на верхний, промежуточный и нижний элементы грунта, движущегося по ножу, будут соответственно равны

$$T_1 = \frac{1}{2} q''_{D_1} l_{D_1D} B; \quad T_2 = \frac{1}{2} (q''_{D_1} + q''_{D_2}) l_{D_2D_1} B; \quad T_3 = \frac{1}{2} (q''_o + q''_{D_2}) l_{OD_2} B.$$

Рассмотрим верхний элемент D_1K_1KD (рис. 2). Сила C_1 от остаточного сцепления, действующего на площадке скольжения D_1D , будет равна

$$C_1 = c_p l_{D_1D} B.$$

Учтем это при составлении уравнений равновесия, которые будут выглядеть так

$$\begin{aligned} \Sigma X &= -N_1 \cos \alpha + R_1 \sin(\alpha + \omega_1) - T_1 \sin(\alpha - \rho) + C_1 \cos \alpha = 0; \\ \Sigma Y &= N_1 \sin \alpha - G_1 + R_1 \cos(\alpha + \omega_1) - T_1 \cos(\alpha - \rho) - C_1 \sin \alpha = 0. \end{aligned}$$

Из этих уравнений получим

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{N_1 \cos \alpha + T_1 \sin(\alpha - \rho) - C_1 \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_1)}, \\ N_1 &= \frac{G_1 \sin(\alpha + \omega_1) + T_1 \sin(\omega_1 + \rho)}{\cos \omega_1} + C_1. \end{aligned}$$

Таким образом, определены все силы, действующие на верхний элемент грунта, перемещаемый по ножу.

Перейдем к равновесию промежуточного элемента грунта $D_2K_2K_1D_1$.

Уравнения проекций сил на координатные оси X и Y будут выглядеть так

$$\begin{aligned}\Sigma X &= R_2 \sin(\alpha + \omega_2) - N_2 \cos \alpha + N_1 \cos \alpha - T_2 \sin(\alpha - \rho) + C_2 \cos \alpha = 0; \\ \Sigma Y &= R_2 \cos(\alpha + \omega_2) - G_2 + N_2 \sin \alpha - N_1 \sin \alpha - T_2 \cos(\alpha - \rho) - C_2 \sin \alpha = 0.\end{aligned}\quad (2.69)$$

Сила сцепления C_2 на площадке скольжения D_2D_1 будет равна

$$C_2 = c_p l_{D_2D_1} B.$$

Решая эту систему уравнений, получим

$$\begin{aligned}R_2 &= \frac{(N_2 - N_1) \cos \alpha + T_2 \sin(\alpha - \rho) - C_2 \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_2)}, \\ N_2 &= \frac{G_2 \sin(\alpha + \omega_2) + T_2 \sin(\omega_2 + \rho)}{\cos \omega_2} + N_1 + C_2.\end{aligned}$$

В итоге определены все силы, действующие на промежуточный элемент грунта $D_2K_2K_1D_1$, перемещающийся по поверхности ножа на участке, имеющем угол внешнего трения ω_2 .

Перейдем к нижнему элементу OBK_2D_2 .

Уравнения проекций на оси X и Y сил, действующих на нижний элемент грунта, получены аналогичным образом и будут выглядеть так

$$\begin{aligned}\Sigma X &= -E \sin(\psi + \rho) - C_{OB} \cos \psi - T_3 \sin(\alpha - \rho) + N_2 \cos \alpha + R_3 \sin(\alpha + \omega_3) + C_3 \cos \alpha = 0; \\ \Sigma Y &= E \cos(\psi + \rho) - G_3 - C_{OB} \sin \psi - T_3 \cos(\alpha - \rho) - N_2 \sin \alpha + R_3 \cos(\alpha + \omega_3) - C_3 \sin \alpha = 0.\end{aligned}$$

Сила C_3 от остаточного сцепления на площадке скольжения OD_2 будет равна

$$C_3 = c_p l_{OD_2} B,$$

а сила сцепления грунта ненарушенной структуры на площадке сдвига OB

$$C_{OB} = c l_{OB} B,$$

где l_{OB} – длина площадки сдвига, c – удельное сцепление грунта.

Значения сил R_3 и E получим в виде

$$\begin{aligned}E &= \frac{G_3 \sin(\alpha + \omega_3) - C_{OB} \cos(\alpha + \omega_3 + \psi) + (C_3 + N_2) \cos \omega_3 + T_3 \sin(\omega_3 + \rho)}{\sin(\alpha + \omega_3 + \psi + \rho)}, \\ R_3 &= \frac{E \sin(\psi + \rho) + C_{OB} \cos \psi + T_3 \sin(\alpha - \rho) - N_2 \cos \alpha - C_3 \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_3)}.\end{aligned}$$

Таким образом, полученные уравнения, позволяют 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 ψ , 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.

Зная силу E , становится возможным найти величину приведенного давления q , действующего непосредственно в момент сдвига на площадку, так как установлено [], что устойчивость этой площадки будет минимальной именно в момент сдвига. Это давление будет равно

$$q = \frac{E}{Bh} \sin \psi + \frac{c}{\sin \rho},$$

где h – толщина стружки.

Расчет угла сдвига при наличии призмы волочения осуществляется по формулам [].

При выполнении условия

$$q \geq q_0 \frac{\sin \Delta_0}{\sin(\Delta_0 - \delta_0)} \cos \rho, \quad 1^*$$

где

$$\Delta_0 = \arcsin \frac{\sin \delta_0}{\sin \rho},$$

угол сдвига будет равен

$$\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} - \frac{1}{2}(\Delta_0 - \delta_0) - \frac{\ln A}{2 \operatorname{tg} \rho},$$

где

$$A = \frac{q \sin(\Delta_0 - \delta_0)}{q_0 \sin \Delta_0 \cos \rho}.$$

Если условие (1*) не выполняется, то

$$\psi = \frac{3}{4}\pi - \frac{\rho}{2} - \frac{1}{2}(\Delta_0 - \delta_0) + \Delta_p,$$

где

$$\Delta_p = \arcsin \frac{\sin \delta_p}{\sin \rho};$$

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

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

Таким образом, решая совместно уравнение () с уравнением () или(), в зависимости от выполнения условия (), можно найти величину угла сдвига, удовлетворяющую всем используемым уравнениям. Вычисления осуществляются итерационными методами до получения результата с требуемой точностью.

Алгоритм вычислений будет выглядеть следующим образом:

- задаемся необходимыми геометрическими размерами исследуемого ножа;
- задаемся необходимыми физико-механическими свойствами исследуемого грунта;
- принимаем начальное значение угла сдвига ψ ;
- вычисляем геометрические размеры перемещаемых по ножу элементов грунта отдельно для каждого из слоев антифрикционного покрытия;
- вычисляем геометрические размеры призмы волочения и определяем силы, действующие с ее стороны на перемещаемый по ножу грунт и его разрабатываемую поверхность;
- вычисляем силы, действующие со стороны призмы волочения на каждый из выделенных элементов грунта;
- уточняем граничные условия на поверхности разрабатываемого грунта на линии выхода площадки сдвига;

- вычисляем силовые параметры для каждого из выделенных элементов грунта, начиная с верхнего, с учетом влияния призмы волочения;
- определяем приведенное давление, действующее на площадку сдвига непосредственно в момент сдвига, с учетом влияния призмы волочения;
- определяем численное значение угла сдвига, выдерживающего это давление, с учетом влияния призмы волочения на граничные условия на поверхности разрабатываемого грунта;
- сравниваем полученное значение угла сдвига с начальным;
- при их несовпадении корректируем начальное значение угла сдвига соответствующим образом;
- повторяем процесс вычислений, приведенный выше, до получения результата с требуемой точностью.

Таким образом, становятся известными не только значения всех сил, изображенных на рис. 2, но и все геометрические параметры, характеризующие процесс копания грунта плоским ножом со слоистым антифрикционным покрытием. После расчета угла сдвига можно перейти к расчету сопротивлений резанию.

Касательная составляющая сопротивления резанию, действующая непосредственно в момент сдвига, в соответствии со схемой на рис. 2 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 () и () примут вид

$$E_{\min} = \frac{G_3 \sin(\alpha + \omega_3) + (C_3 + N_2) \cos \omega_3 + T_3 \sin(\omega_3 + \rho)}{\sin(\alpha + \omega_3 + \psi + \rho)},$$

$$R_3^{\min} = \frac{E_{\min} \sin(\psi + \rho) + T_3 \sin(\alpha - \rho) - N_2 \cos \alpha - C_3 \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_3)}.$$

Подставляя эти значения в уравнения () и () вместо сил E и R_3 , найдем значения касательной и нормальной составляющих сопротивления резанию, действующих после сдвига грунта по площадке ОБ.

Максимально возможная амплитуда колебаний составляющих сопротивления копанию при большом сдвиге будет равна

$$\Delta P_1 = P_1^{\max} - P_1^{\min} = (R_3 - R_3^{\min}) \sin(\alpha + \omega_3),$$

$$\Delta P_2 = P_2^{\max} - P_2^{\min} = (R_3 - R_3^{\min}) \cos(\alpha + \omega_3).$$

Из полученных уравнений видно, что сцепление грунта, действующее на площадке сдвига ОБ, приводит к колебаниям только силы R_3 , действующей на нижний участок ножа.

Приведем результаты исследований (рис.3), полученные по изложенной методике применительно к ножу с шириной $B=1$ м, длиной $l=0,2$ м при $h=0,02$ м и $l=1$ м при $h=0,2$ м, установленному под углом резания $\alpha=60^\circ$. Копание таким

плоским рабочим органом близко к процессам копания отвалом и ковшем скрепера. Но более простые условия движения грунта по ножу и как следствие более простая расчетная схема позволяют легче его исследовать. Рассматривался нож с покрытием, длина которого l изменялась от максимально возможной (при полном покрытии ножа) до минимальной.

Исследования проводились для наиболее характерного грунта на строительных площадках Республики Беларусь. Таким грунтом [] является грунт II-III категории (по числу ударов ударника ДорНИИ), для которого можно принять следующие физико-механические свойства: угол внутреннего трения $\rho=30^\circ$, удельное сцепление $c=40$ кПа, плотность $\rho_r=1,6$ т/м³. Угол внешнего трения ω для ножа без покрытия принимался равным 28° , с покрытием – 20° .

Результаты расчетов при копании с толщиной стружки $h=0,02$ м и $h=0,2$ м представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что влияние призмы волочения существенно сказывается на процессе копания (результаты, представленные на этом рисунке для случая, когда отсутствует призма волочения, получены искусственно). Особенно заметно влияние призмы волочения при малых толщинах стружки (рис. 3,а).

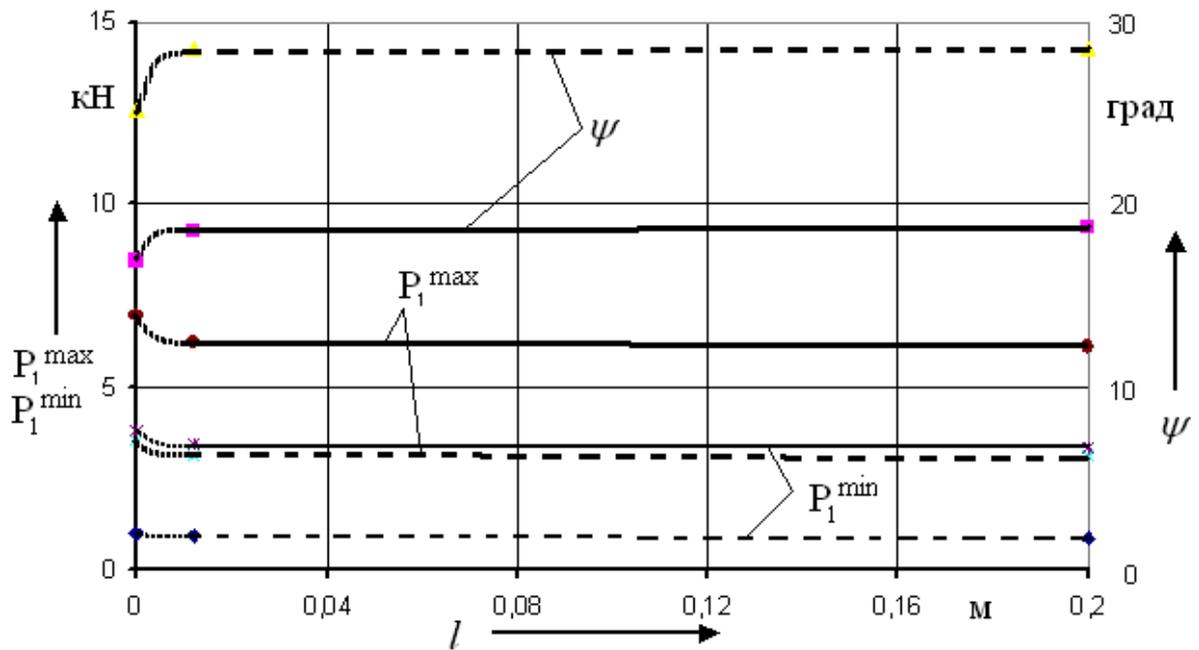
Это в достаточной степени объясняется рисунком 4. Из этого рисунка видно, что поток грунта ОВКД, перемещаемый по ножу, имеет незначительную толщину при $h=0,02$ м. Поэтому влияние призмы волочения на этот поток весьма существенно по сравнению с таким же влиянием на поток ОВКД при толщине стружки $h=0,2$ м, когда вес перемещаемого потока превышает вес призмы волочения.

Общий характер влияния антифрикционного покрытия остается неизменным как при наличии, так и при отсутствии призмы волочения []. Хотя при этом заметно, что если при толщине стружки $h=0,2$ м антифрикционный слой минимальной длины увеличивает угол сдвига на 13% и снижает силу P_1^{\max} до 82% по сравнению с ножом без покрытия, то при $h=0,02$ м эти цифры значительно хуже. Угол сдвига увеличивается на 10%, а сила P_1^{\max} составляет 89% от этой же силы у ножа без покрытия.

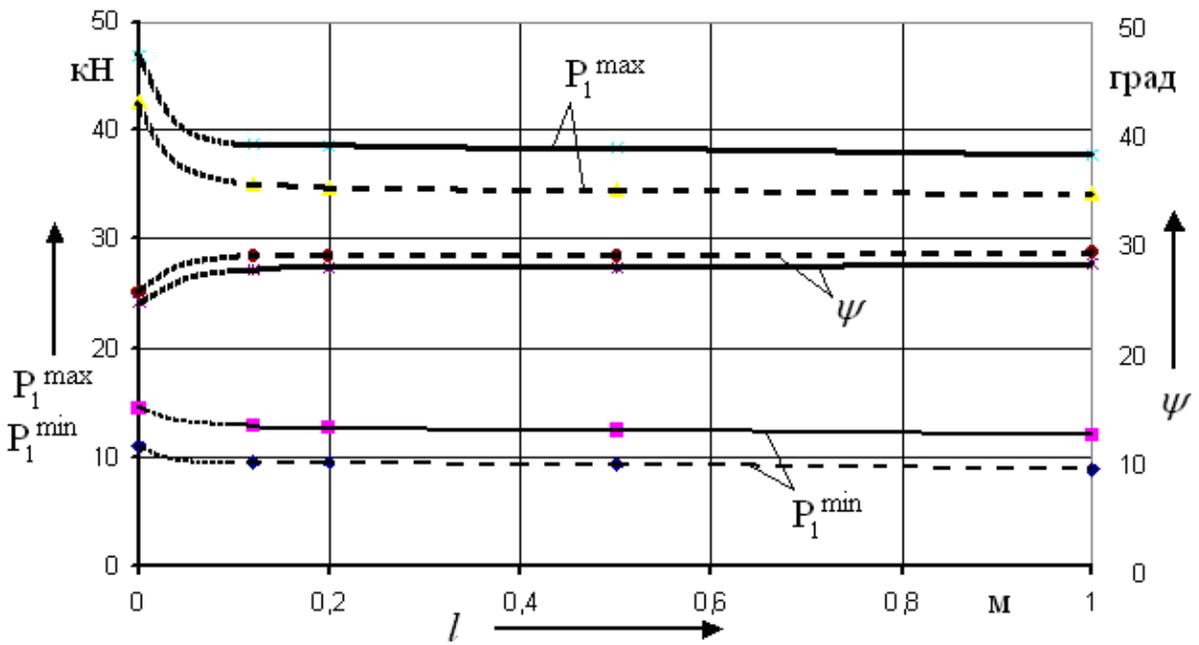
Минимальную длину антифрикционного покрытия можно в первом приближении принять, из условия, что нижний участок с антифрикционным покрытием должен выходить на поверхность разрабатываемого грунта, то есть

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

Это вытекает из того, что именно этот участок ВК₂ совместно с площадкой сдвига ОВ (рис. 2) образуют две грани, осуществляющие выклинивание грунта из зоны резания и перемещение его по поверхности ножа. Однако специальными исследованиями установлено, что длина нижнего участка может не превышать 50% от толщины стружки при $\alpha=60^\circ$. Это вытекает из того, что именно на этом участке ножа возникают самые большие давления. Именно эти участки следует защищать от износа термообработкой или наплавкой и наносить на эти участки антифрикционное покрытие.



а)



б)

Рис. 3. Влияние длины l слоя антифрикционного покрытия на угол сдвига ψ , максимальное P_1^{\max} и минимальное P_1^{\min} значения касательной составляющей сопротивления копанью при толщине стружки $h=0,02$ м (а) и $h=0,2$ м (б) при угле резания $\alpha=60^\circ$ при наличии призмы волочения (сплошные линии) и ее отсутствии (штриховые линии).

Если вся поверхность рабочего органа будет иметь антифрикционное покрытие, то при $h=0,02$ м угол сдвига увеличится на 14,5%, а сила P_1^{\max} снизится до 84,5%, и эти цифры будут предельны для данного покрытия. При $h=0,2$ м они будут такими же для угла сдвига, но сила P_1^{\max} снизится до 80,5%, что свидетельствует об большей эффективности антифрикционного покрытия при бо-

лее толстых стружках, хотя при этом минимальная длина такого покрытия при $\alpha=60^\circ$ для рассматриваемых условий увеличится с 0,01 м до 0,1 м.

Показательно, что при покрытии всей поверхности рабочего органа антифрикционным покрытием его длина увеличивается в 20 раз при $h=0,02$ м и $l=0,2$ м (с минимальной 0,01 м до максимальной 0,2 м), и в 10 раз (с минимальной 0,1 м до максимальной 1 м) при $l=1$ м при $h=0,2$ м, хотя при этом сила P_1^{\max} снизится всего на 4,5% при $l=0,2$ м и 1,5% при $l=1$ м по сравнению с минимальной длиной покрытия.

Следовательно, учитывая относительную дороговизну антифрикционных покрытий, полученные результаты позволяют более обоснованно подойти к выбору расчетной длины покрытия с учетом допустимой степени износа ножей.

Таким образом, приведенные уравнения, отражающие физическую сущность перемещения элементов грунта по соответствующим участкам поверхности плоского рабочего органа с разными коэффициентами внешнего трения, позволяют рассчитать силовые и геометрические параметры этого процесса.

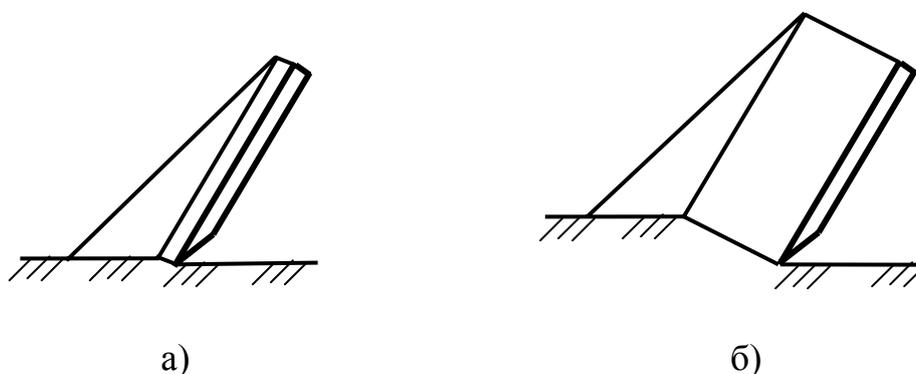


Рис. 4. Масштабные схемы копания плоским рабочим органом, установленным под углом $\alpha=60^\circ$ при толщине стружки $h=0,02$ м (а) и $h=0,2$ м (б).

Приведенные исследования подтвердили, что одним из перспективных направлений совершенствования режущих элементов рабочих органов землеройных машин является покрытие их режущей части современными прочными антифрикционными материалами или соответствующей термообработкой [].

Расчет параметров резания грунта таким ножом и выбор рациональной длины такого покрытия можно осуществить при помощи разработанного авторами программного обеспечения, выполняющего расчеты по приведенной методике.

Литература:

1. Берестов Е.И., Смоляр А.П., Афгами Алишах А.Х., Джалилванд Э.Х. Влияние трения грунта на поверхности ножа на сопротивление резанию. Статья в журн.: Строительные и дорожные машины, 2010, №11, с.34-38.
2. Густов Ю.И. Триботехника строительных машин и оборудования. – М.: МГСУ, 2011. – 190 с.
3. Берестов Е.И., Афгами Алишах А.Х., Джалилванд Э.Х. Резание грунта ножом с антифрикционным покрытием. - Статья в журн.: Механизация строительства, 2011, №3, с. 6-9.

4. Соболевский Ю.А. Механика грунтов. – Минск: Высшая школа, 1986. – 176 с.
5. Терцаги К. Теория механики грунтов. – М.: Стройиздат, 1961. – 508 с.
6. Берестов Е.И. Сопротивление грунтов резанию. - Статья в журн.: Известия Вузов. Строительство, 1997, N 10, с.102-107.