

УДК 621.828.6

ВЛИЯНИЕ ТРЕНИЯ ГРУНТА НА ПОВЕРХНОСТИ НОЖА НА
СОПРОТИВЛЕНИЕ РЕЗАНИЮ

Е.И. БЕРЕСТОВ - д-р техн. наук, проф., А.П. СМОЛЯР - к-т техн.
наук, доц., А.Х. АФХАМИ АЛИШАХ, Э.Х. ДЖАЛИЛВАНД - аспиранты

Могилев, Беларусь

Резание грунта является составной частью рабочего процесса многих землеройных машин: землеройно-транспортных, фрезерных, щелерезных, различных видов траншеекопателей, машин для разработки полезных ископаемых, многих сельскохозяйственных машин.

Поскольку рабочий процесс этих машин характеризуется относительно высокими затратами энергии, то очень важно исследовать возможные варианты совершенствования рабочего оборудования с целью снижения энергоемкости.

Одним из таких путей, которому на современном этапе развития техники, на наш взгляд, не уделяется достаточного внимания, является снижение трения между поверхностью рабочего органа и перемещающимся по ней грунтом.

Этот вопрос достаточно широко исследовался в 60-80 годы прошлого века. Для снижения трения использовались различные типы покрытий с низким коэффициентом трения а также физические методы воздействия на

рабочее оборудование. Так, применительно к бульдозеру, исследовались керамические и полимерные покрытия. Из физических методов исследовалось [1] использование электроосмоса, вибрации, газовой смазки, магнитострикторов и др.

Анализ литературных источников тех времен, 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. Второй напрашиваемый вывод – если результаты исследования антифрикционных покрытий характеризуют снижение сопротивления за счет уменьшения трения между грунтом и поверхностью рабочего органа, то результаты исследования воздействия физических методов приводятся обычно в общем виде, без четкой дифференциации, какой эффект получен за счет снижения сил трения по поверхности ножа, а какой – за счет изменения механических свойств грунта.

Безусловно, одной из главных причин утери интереса к данной проблеме, являлась низкая долговечность покрытий, с одной стороны, а также громоздкость оборудования для использования физических методов воз-

действия и вредное влияние некоторых из них, например, вибрации, на машину и необходимость защиты от такого влияния машиниста.

В последние годы достигнуты значительные успехи в области создания материалов с заданными свойствами. Это открывает дорогу и для создания антифрикционных материалов с большой износостойкостью для покрытия поверхностей рабочих органов землеройных машин, что позволяет вновь обратиться к более глубокому теоретическому изучению проблемы снижения сил трения. Это возможно лишь при наличии метода расчета, идентификационного рабочему процессу по параметрам, доступным инструментальной проверке.

Исследуем этот процесс на основе метода [2], рассматривающего разрушение грунта как процесс, состоящий из двух последовательных фаз: разрушения грунта в первой фазе внедряемым в него рабочим органом и дальнейшего его разрушения во второй фазе под воздействием давлений, возникающих при вытеснении отделенного при первой фазе элемента стружки. Метод сводится к определению устойчивости откоса против дальнейшего его разрушения от действующего на него в момент сдвига давления и основан на использовании положений, выдвинутых еще С.Garbotz и G.Drees [3], и методе расчета угла сдвига по граничным условиям [2]. Использование этого метода позволяет наряду с силовыми определить и геометрические параметры массы грунта, перемещаемого по ножу, так как известны угол сдвига, размеры ножа и толщина срезаемой

стружки, что позволяет оценивать его соответствие экспериментальным данным по всем доступным измерениям параметрам, как силовым, так и геометрическим. Принятый метод расчета успешно зарекомендовал себя при исследовании лобового и косоого резания грунта [2].

Применительно к наиболее простому процессу лобового резания суть метода сводится к следующему.

Из условий равновесия грунтового тела $OBKD$ (рис. 1) можно получить, что сила E_{max} , действующая со стороны площадки сдвига, и сила R_{max} , действующая со стороны ножа, будут равны

$$E_{max} = \frac{G \sin(\alpha + \omega) - C_{OB} \cos(\alpha + \omega + \psi)}{\sin(\alpha + \omega + \psi + \rho)}; \quad (1)$$

$$R_{max} = \frac{E_{max} \sin(\psi + \rho) + C_{OB} \cos \psi}{\sin(\alpha + \omega)}, \quad (2)$$

где α - угол резания; ω - угол внешнего трения; ψ - угол сдвига; ρ - угол внутреннего трения; G - вес тела $OBKD$; C_{OB} - сила сцепления грунта, действующая в момент сдвига по площадке OB .

Значения сил, входящих в уравнения (1) и (2), определяются по формулам

$$G = Blh \rho_2 g \frac{\sin(\alpha + \psi)}{\sin \psi}; \quad (3)$$

$$C_{OB} = \frac{Bch}{\sin \psi}, \quad (4)$$

где B - ширина ножа; ρ_2 – плотность грунта в теле $OBKD$; l - длина ножа; h - толщина стружки; c - удельное сцепление грунта.

Угол сдвига ψ определяется по граничным условиям на поверхности грунта и площадке сдвига OB :

$$\text{при } A > 1 \quad \psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} - \frac{\text{ctg}\rho}{2} \ln A, \quad (5)$$

$$\text{если } A < 1, \text{ то } \psi = \frac{3}{4}\pi - \frac{\rho}{2} + \Delta_p, \quad (6)$$

$$\text{где } \Delta_p = \arcsin \frac{\sin \delta_p}{\sin \rho}; \quad \delta_p = -\arccos \left[\frac{\cos \rho (1 + A)}{2\sqrt{A}} \right]. \quad (7)$$

В этих уравнениях

$$A = \frac{q}{H} \frac{1 - \sin \rho}{\cos \rho}, \quad (8)$$

где q - приведенное давление, действующее на площадку OB в момент сдвига; H - давление связности.

Эти величины определяются по формулам

$$q = \frac{E_{\max}}{Bh} \sin \psi + \frac{c}{\sin \rho}; \quad (9)$$

$$H = \frac{c}{\text{tg}\rho}. \quad (10)$$

Таким образом, угол сдвига ψ определяется из решения системы уравнений (1...10).

При известном значении силы R_{max} касательная P_1 и нормальная P_2 составляющие сопротивления копанию будут соответственно равны

$$P_1 = R_{max} \sin(\alpha + \omega); \quad P_2 = R_{max} \cos(\alpha + \omega).$$

Анализ приведенных выше уравнений и многоугольников сил (рис. 1) а также графическое решение этой системы и результаты расчетов (рис. 2) показывают, что внешнее трение грунта по ножу изменяет величину приведенного давления q , действующего на площадку сдвига, а, следовательно, и положение этой площадки, определяемое углом сдвига ψ . Величина угла сдвига на рис. 2 (а) находится на точке пересечения кривой 1, характеризующей устойчивость площадки сдвига OB и полученной по уравнениям (5-8, 10), с остальными кривыми, полученными при разных значениях угла внутреннего трения ω и угла резания α по уравнениям (1-4, 9).

Результаты получены для ножа с размерами: $B=0,1$ м; $l=0,1$ м; $h=0,02$ м при двух значениях угла резания $\alpha=30^\circ$ и $\alpha=60^\circ$ на грунте со следующими физико-механическими свойствами: $\rho=28^\circ$; $\rho_z=16$ кН/м³; $c=4$ кПа для разных значений угла внешнего трения.

Таким образом, изменение трения между ножом и грунтом приводит к изменению положения площадки сдвига, а следовательно, и к изменению всех остальных параметров, характеризующих взаимодействие системы

«нож-грунт» точно так же, как к этому приводит и изменение геометрических размеров ножа.

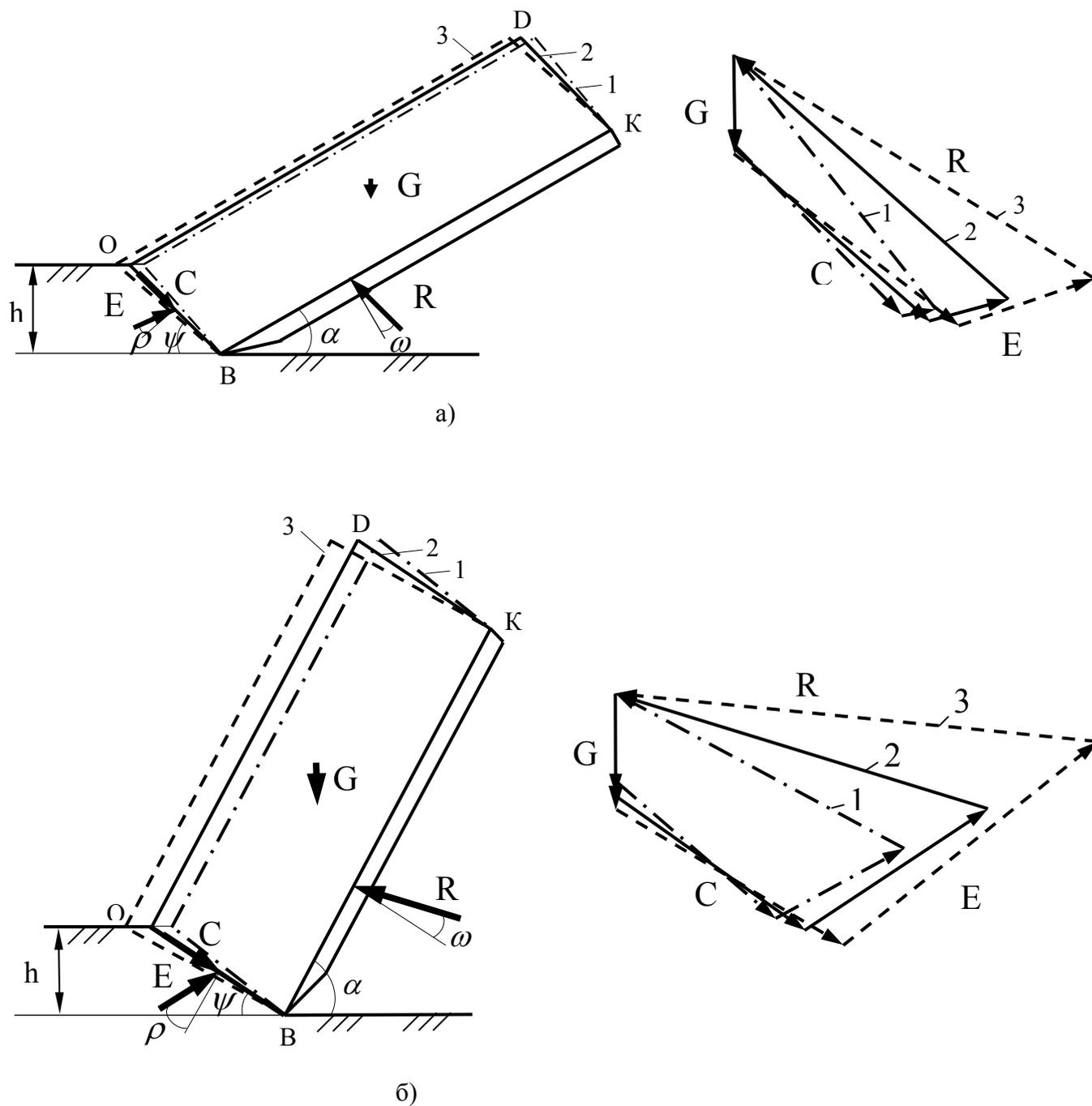


Рисунок 1. Масштабные схемы резания и многоугольники сил при углах резания $\alpha=30^\circ$ (а) и $\alpha=60^\circ$ (б): 1 – при $\omega=5^\circ$; 2 – при $\omega=15^\circ$; 3 - при $\omega=25^\circ$.

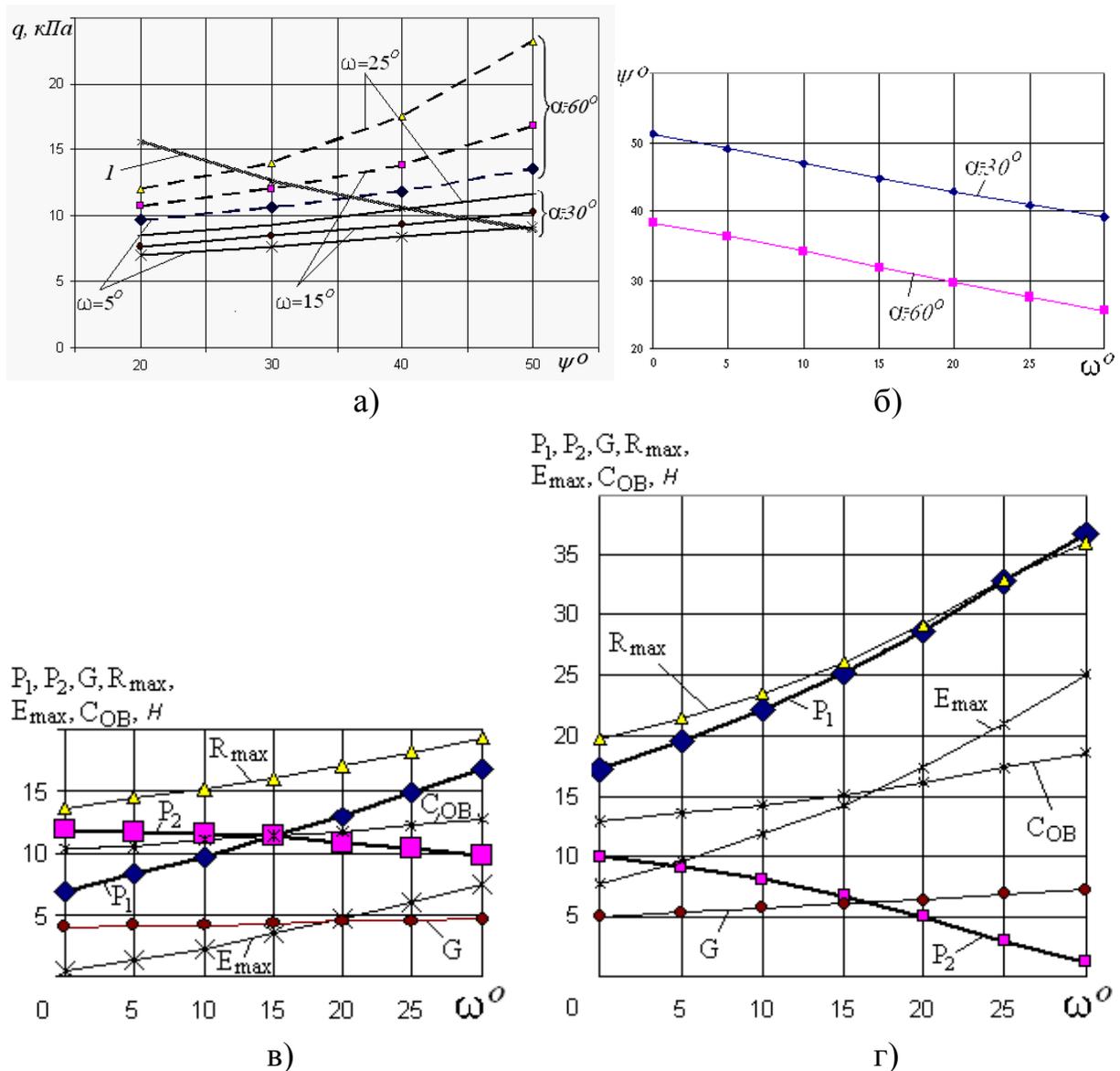


Рис.2. Результаты исследований: графическое определение угла сдвига (а); влияние угла внешнего трения на угол сдвига (б) и силовые параметры при углах резания $\alpha=30^\circ$ (в) и $\alpha=60^\circ$ (г).

Результаты теоретических исследований влияния угла внешнего трения на некоторые силовые параметры, приведенные на рис. 2 (б, г) позволяют наглядно оценить влияние внешнего трения как на касательную P_1 и

нормальную P_2 составляющие сопротивления копанию, так и на другие силовые параметры, рассчитанные по рассмотренному выше методу.

В работе [2] отмечено, что для оценки взаимодействия рабочего органа с грунтом, перемещаемым по нему, достаточно рассмотреть процесс при большом сдвиге, так как именно при этом сдвиге формируются размеры грунтового потока, а, следовательно, и все основные факторы, характеризующие это взаимодействие. Если же необходимо получить амплитудно-частотную характеристику нагруженности рабочего органа, нужно рассматривать как большие, так и малые сдвиги.

Такие исследования были проведены при помощи специального метода [4] расчета, базирующегося на изложенных принципах, и на рис. 3 (а, б) приведены результаты расчетов применительно к ножу из металла без покрытия и ножу, покрытому пластиком. На рисунках изображены характер изменения касательной составляющей P_1 сопротивления резанию и положение площадок малых и больших сдвигов за цикл между двумя соседними большими сдвигами при установившемся процессе резания. Из графиков видно, что влияние угла внешнего трения наиболее существенно на амплитуду колебаний сил и незначительно на частоту их появлений.

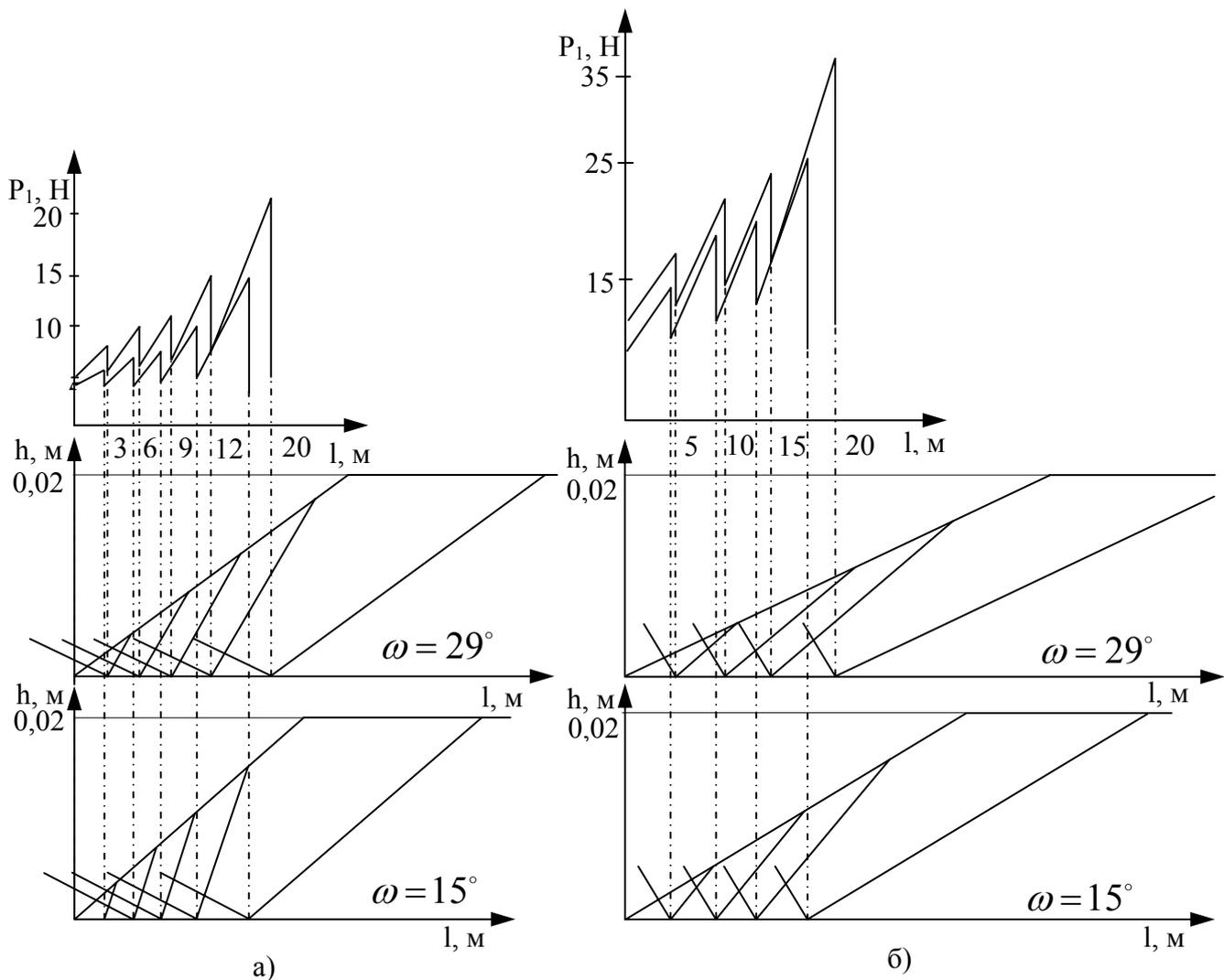


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика и масштабные схемы разрушения грунта при угле резания $\alpha=30^\circ$ (а) и $\alpha=60^\circ$ (б) для металла ($\omega=29^\circ$) и пластика ($\omega=15^\circ$).

Таким образом, исследования по методам [2, 4] позволяют оценить эффективность конструктивных способов снижения трения между ножом и грунтом аналитическими расчетами, без проведения экспериментальных исследований. Необходимо только определить коэффициент трения между грунтом и ножом с новым покрытием или с новым конструктивным спосо-

бом снижения трения. Исключение дорогостоящей измерительной аппаратуры позволяет в значительной степени снизить стоимость таких экспериментов. Дальнейшая оценка новой разработки будет сводиться к ее анализу и оптимизации геометрических параметров рабочего органа по изложенной методике. Экспериментальные исследования будут необходимы лишь для оценки работоспособности и долговечности используемого метода снижения сил трения по поверхности рабочего органа.

В свете изложенного нами были проведены предварительные опыты по замеру коэффициента трения между грунтом и разными материалами. Коэффициент трения определялся отношением силы, необходимой для перемещения предмета по грунту, к весу предмета. Опыты показали, что влияние типа и шероховатости поверхности материала на коэффициент трения очень сильное, о чем можно судить из приведенных в табл. 1 результатах. В этой же таблице приведены численные значения угла сдвига ψ и составляющих сопротивления копанию P_1 и P_2 для условного ножа из исследуемых материалов, имеющего размеры, приведенные выше, при $\alpha=30^\circ$.

Приведенные результаты достаточно убедительно показывают, что следует уделять очень серьезное влияние этой проблеме, и что за счет применения специальных покрытий или иных конструктивных способов снижения трения между грунтом и рабочим органом силу сопротивления резанию можно значительно уменьшить.

Таблица 1. Результаты замеров коэффициента трения
и расчетов параметров сопротивления резанию.

Материал	металл	крашеный металл	пластмасса	пластик	вибрирующий металл
Коэффициент трения μ	0,56	0,53	0,47	0,28	0,14
Угол трения φ , град.	29	28	25	15	7,5
Угол сдвига ψ , град.	39	39,4	40,9	44,8	48
P_1 , Н	16,4	16	14,8	11,3	9
P_2 , Н	10	10	10,4	11,3	11,7

На основании этих результатов можно сделать выводы:

- одним из важных факторов, на который может повлиять человек, является трение между грунтом и рабочим органом;
- количественная оценка влияния этого фактора на сопротивление резанию и другие параметры резания грунта в технической литературе практически отсутствует;
- использованные авторами методы расчета позволяют оценить влияние трения не только на силовые, включая и амплитудно-частотную характеристику, но и на геометрические параметры резания, что подтверждается результатами на рисунках;
- значительного снижения сопротивления резанию можно достигнуть за счет использования наплавов из материалов с низким коэффициентом трения или использования вибрации рабочего органа;

- необходимо выяснить, какие параметры вибрации оказывают максимальное влияние на трение между рабочим органом и грунтом с целью разумного использования вибрации при резании грунта.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Баловнев В.И. Дорожно-строительные машины с рабочими органами интенсифицирующего действия. – М: Машиностроение, 1981. – 223 с.

2. Берестов Е.И., Смоляр А.П. Современные проблемы и методы расчета сопротивления грунта резанию (обзор).// Известия национальной академии наук Беларуси. Серия физ.-техн. наук. №3, 2005, с.44-49.

3. Garbotz C., Drees G. Untersuchungen über das Kraftspiel an Flachbagger-Schneidwerkzeugen in Mittelsand und schwach bindigem, sandigem Schluff unter besonderer Berücksichtigung der Planierschilde und ebenen Schurfkubelschneiden. // In Buch: Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen, Köln und Opladen, 1958, Nr. 430, S. 156.

4. Берестов Е.И. Сопротивление грунтов резанию.// Изв. Вузов. Строительство, 1997. - № 10. - С. 102-107.