

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.828.6

АФХАМИ АЛИШАХ
Алиасгар Хассан

**СНИЖЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГРУНТА
ЗА СЧЕТ УМЕНЬШЕНИЯ ТРЕНИЯ НА РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ
ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.05.04 - дорожные, строительные
и подъемно-транспортные машины

Могилев 2015

Научная работа выполнена в государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»

Научный руководитель **Берестов Евгений Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные, дорожные, подъемно-транспортные машины и оборудование» ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Официальные оппоненты: **Прушак Виктор Яковлевич**, доктор технических наук, профессор, технический директор ЗАО "Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с опытным производством".

Смоляк Анна Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительные и дорожные машины», УО «Белорусский национальный технический университет»

Оппонирующая организация **УО «Белорусский государственный университет транспорта»**

Защита состоится 20 ноября в 14-00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.12 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т. Независимости, 65, гл. корп., ауд. 202, E-mail: www.smolyak.anna@mail.ru, телефон ученого секретаря (+375-29) 279-32-52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан октября 2015 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций

А.Н.Смоляк

ВВЕДЕНИЕ

Снижение сопротивления грунта при его разработке землеройными машинами является важной и актуальной задачей вследствие значительной энергоемкости этого процесса и больших объемов работ во всем мире, имеющих тенденцию к увеличению. Эта работа ведется по нескольким направлениям, одним из которых является уменьшение трения поверхности рабочего органа о грунт. И хотя эта проблема очевидна, в технической литературе данный вопрос применительно к землеройным машинам длительное время практически не освещался. Между тем снизить трение между грунтом и рабочим органом можно относительно простыми способами: наплавкой материалов с низким коэффициентом трения, правильной термообработкой трущихся поверхностей, а также нанесением на поверхность рабочего органа антифрикционного покрытия.

Для оценки эффективности снижения сил трения необходим метод расчета, позволяющий всесторонне проанализировать влияние трения на рабочий процесс землеройных машин. Это особенно важно при применении антифрикционных покрытий, поскольку они могут иметь относительно высокую стоимость.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Работа выполнялась по госбюджетной теме ГБ-0602 (номер госрегистрации 2006563) «Методы проектирования, модернизации и эксплуатации строительных, дорожных, подъемно-транспортных машин с целью улучшения их характеристик» и госбюджетной теме ГБ-1103 (номер госрегистрации 20111328) «Строительные, дорожные, подъемно-транспортные машины и оборудование: проектирование, диагностирование и эксплуатация».

Цель и задачи исследования

Целью работы является обоснование параметров антифрикционных участков на режущих элементах землеройных машин, снижающих сопротивления грунта при его разработке.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- разработать методы расчета сопротивлений грунта при его взаимодействии с рабочими органами основных типов землеройных машин, поверхность которых или ее часть имеет более низкий коэффициент трения;
- исследовать и выявить особенности влияния антифрикционных участков на параметры, характеризующие разработку грунта землеройными машинами;
- выработать рекомендации по практическому использованию полученных результатов при проектировании рабочих органов землеройных машин.

Научная новизна

Разработан аналитический метод, который обеспечивает расчет параметров, характеризующих резание грунта плоским ножом, имеющим на рабочей поверхности несколько антифрикционных участков с разным коэффициентом трения и позволяющий оценить влияние антифрикционных участков на рабочий процесс.

Разработаны методы расчета копания грунта бульдозерами и скреперами, оснащенных ножами, на поверхности которых имеются антифрикционные участки ограниченной длины, что позволяет оценить их влияние на рабочие процессы.

Обоснован выбор минимальной длины антифрикционного участка, которая не должна быть меньше 60% от толщины стружки при угле резания $\alpha=30^\circ$, и 50% - при $\alpha=60^\circ$, что позволит снизить затраты материалов и энергии при изготовлении.

Обоснованы рекомендации по использованию антифрикционных участков на ножах машин с плоским, отвальным и ковшовым рабочим органом, показывающие, что наименьшую эффективность антифрикционный участок будет иметь у скрепера из-за значительного увеличения сопротивлений перемещению грунта внутри ковша (11,5...2% в зависимости от степени заполнения ковша).

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся научные результаты проведенных исследований:

- разработанный аналитический метод, который обеспечивает расчет параметров резания грунта плоским ножом, имеющим несколько антифрикционных слоев с разным коэффициентом трения, и позволяет оценить влияние антифрикционных слоев на рабочий процесс;
- разработанные методы расчета параметров копания отвалом бульдозера и ковшом скрепера, оснащенных ножами с антифрикционными участками ограниченной длины, что позволяет оценить их влияние на рабочие процессы исследуемых машин и оптимизировать длину антифрикционных участков;
- результаты исследований влияния трения грунта по ножу с антифрикционными участками, снижающими это трение, на резание и копание грунта, позволившие установить взаимосвязь между длиной антифрикционного слоя и физическими процессами, происходящими при взаимодействии грунта с рабочими органами;
- рекомендации по использованию антифрикционных покрытий на машинах с плоским, отвальным и ковшовым рабочим органом и по выбору минимальной длины антифрикционных покрытий, позволяющие снизить затраты материалов и энергии при их изготовлении.

Личный вклад соискателя

Автором проделана следующая работа: разработаны аналитические методы, обеспечивающие расчет параметров при резании и копании грунта различными типами рабочих органов, когда режущий элемент рабочего органа имеет один или несколько антифрикционных участков с разным коэффициентом трения; выпол-

нены исследования и проанализированы их результаты, позволяющие оценить влияние антифрикционных слоев на резание и копание грунта; получены рекомендации по выбору длины антифрикционных покрытий. Общая концепция исследований разработана совместно с научным руководителем докт. техн. наук, проф. Берестовым Е.И. Совместно с научным руководителем и соавторами участвовал в составлении планов статей и докладов и написании их, подаче идей для заявок на полезные модели и изобретения.

Апробация результатов диссертации

Результаты диссертационной работы докладывались на международных научно-технических конференциях: «Интерстроймех – 2010» (Белгород, 2010), «Интерстроймех – 2011» (Могилев 2011). Результаты исследований обсуждались на заседаниях кафедры «Строительные, дорожные, подъемно-транспортные машины и оборудование» Белорусско-Российского университета в 2010, 2011 и 2012, 2014 и 2015 г.г., на технических семинарах фирмы «Нерсо» (Исламская Республика Иран) в 2010 и 2011 г.г., на научно-техническом семинаре кафедры «Строительные и дорожные машины» Белорусского национального технического университета в 2014 г.

Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре СДПТМиО Белорусско-Российского университета и приняты для использования фирмой Vulkan Alborz со.Ltd (Исламская Республика Иран).

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ: одна глава в монографии, две статьи в журналах Республики Беларусь из перечня изданий ВАК РБ, две статьи в центральных журналах Российской Федерации из перечня изданий ВАК РФ, статья и два тезиса докладов в материалах конференций. Получен патент на изобретение (способ и устройство) и патент Республики Беларусь на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 111 листов машинописного текста (без приложений). Работа содержит перечень условных обозначений (5 л.), 48 рисунков, 4 таблицы и приложения. Библиографический список содержит 84 наименования, включая и авторские работы (10 наименований).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен обзор и анализ работ, посвященных экспериментальным и теоретическим исследованиям сопротивлений, возникающих при резании и копании грунта землеройными машинами. Приведены сведения о методах расчета этих процессов. Выбрано направление исследований.

Формирование нагрузок на рабочий орган непосредственно вытекает из закономерностей сопротивления среды, поэтому основные положения механики грунтов использовали уже E.Dinglinger и J.Rathje. Новый толчок к развитию таких методов расчета дали фундаментальные работы в области механики грунтов В.В.Соколовского. В трудах советских основоположников аналитических методов расчета К.А.Артемьева, В.И.Баловнева, Ю.А.Ветрова резание рассматривалось как пассивное давление грунта на подпорную стенку, такой же подход изложен и в работах зарубежных ученых G.Tyro, G.Vogel, A.Aysen.

G.Drees и G.Garbotz предложили рассчитывать сопротивление грунта резанию исходя из анализа сил, возникающих в плоскости сдвига и на ноже. Свой вклад в развитие такого подхода внес А.М.Холодов, а применительно к процессу копания - В.К.Руднев. Е.И.Берестовым получены аналитические уравнения для расчета угла сдвига, что позволило ему разработать методы расчета геометрических и силовых параметров при послойной разработке грунта ножом, отвалом и ковшом. Такие методы расчета учитывают как условия работы, так и конструктивные особенности рабочих органов, что повышает достоверность и точность расчетов, и по этой причине они приняты в качестве базовых.

Исследованиями Ю.И.Густова установлено, что коэффициент трения грунта по металлу существенно зависит от материала ножа, его термообработки и материала износостойкого покрытия.

Хотя внешнее трение грунта существенно влияет на сопротивление резанию, в существующих исследованиях не рассматриваются рабочие органы, на поверхности которых имеются ограниченные по длине антифрикционные участки. А это особенно важно, поскольку такие участки могут иметь высокую стоимость. Решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Во второй главе изложены методы расчета сопротивлений, позволяющие теоретически обосновать влияние антифрикционных участков на процессы резания грунта и его копания основными типами землеройно-транспортных машин.

При копании грунта плоским ножом (рисунок 1), когда угол резания α превышает угол естественного откоса ε и нож имеет достаточную длину, появляется призма волочения, которая оказывает дополнительное воздействие как на перемещаемый по ножу грунт, так и на разрабатываемую поверхность.

Поскольку может быть несколько антифрикционных участков, то в общей расчетной схеме рассматриваются три участка на поверхности ножа с разным углом внешнего трения грунта $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ и три элемента грунта, перемещаемые по этим участкам ножа.

При известных размерах ножа, толщине срезаемой стружки и принятой на данном этапе расчетов величине угла сдвига ψ , становятся известными размеры перемещаемых по ножу элементов грунта и их вес G_1, G_2, G_3 , размеры призмы волочения, а также ее вес $G_{пр}$.

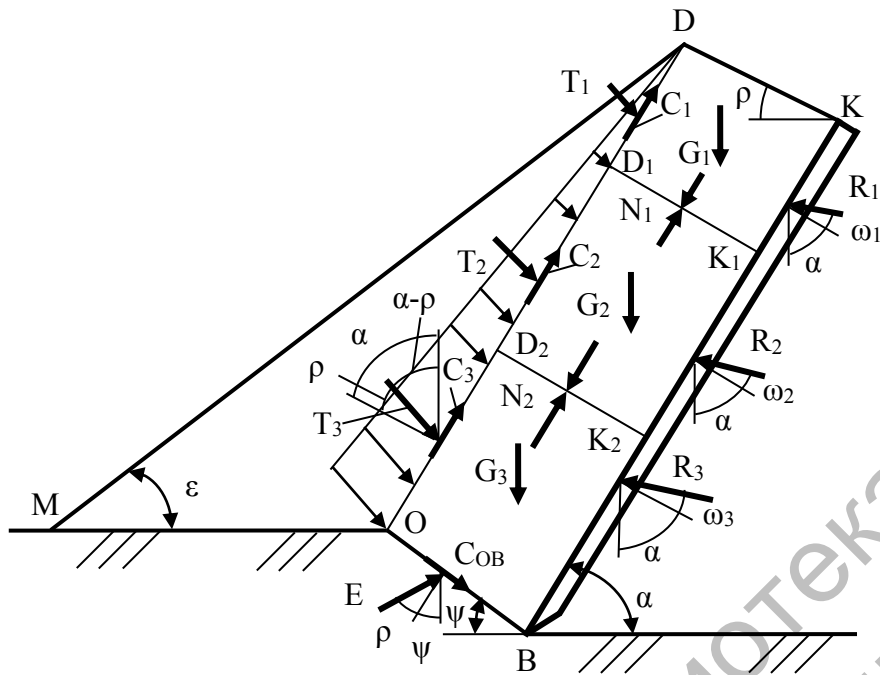


Рисунок 1. - Схема для расчета резания грунта плоским ножом

Из условий равновесия призмы MOD (рисунок 2) находятся силы S и T:

$$T = G_{np} \frac{\sin \rho}{\sin \alpha} + C_{OD} \frac{\cos(\alpha + \rho)}{\sin \alpha} \quad \text{и} \quad S = T \frac{\sin(\alpha - \rho)}{\sin \rho} - C_{OD} \frac{\cos \alpha}{\sin \rho},$$

где ρ – угол внутреннего трения грунта; α – угол резания; C_{OD} – сила остаточного сцепления на площадке скольжения OD

$$C_{OD} = c_p l_{OD} B, \quad (1)$$

где c_p – удельное сцепление грунта в призме волочения; l_{OD} – длина площадки OD; B – ширина ножа.

Для расчета угла сдвига необходимо знать приведенное давление, действующее на поверхность грунта в т. О. Из эпюры давлений призмы волочения на поверхность MO можно получить, что действительное давление равно:

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

где l_{MO} – длина площадки MO.

Тогда приведенное давление q_o и угол его отклонения δ_o (рисунок 2) будут такими:

$$q_o = \sqrt{(\tau')^2 + (\sigma' + H)^2} = \sqrt{(q'_o \sin \rho)^2 + (q'_o \cos \rho + H)^2}, \quad \text{и} \quad \delta_o = \arctg \frac{\tau'}{\sigma' + H} = \frac{q'_o \sin \rho}{q'_o \cos \rho + H},$$

где τ' и σ' – касательная и нормальная проекции действительного давления q'_o ; $H = c \operatorname{ctg} \rho$ – давление связности; c – удельное сцепление грунта.

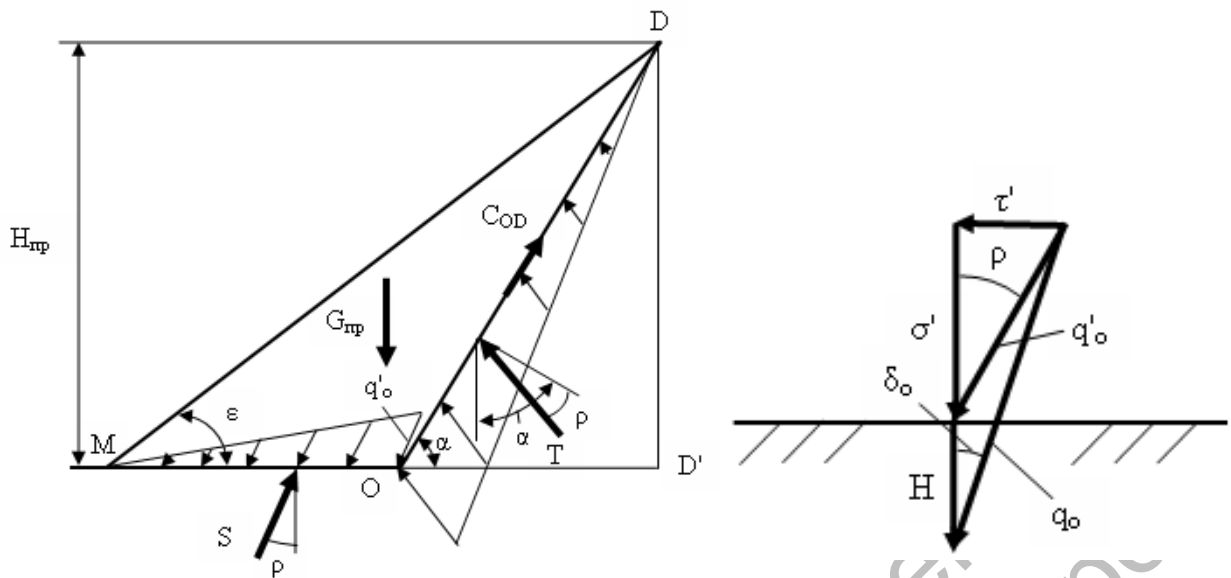


Рисунок 2. - Схемы для расчета призмы волочения и давлений в т. О

Силы T_1 , T_2 и T_3 , которые действуют со стороны призмы волочения на элементы грунта, перемещаемые по ножу, на отрезках D_1D , D_2D_1 и OD_2 (рисунок 1), определяются из эпюры давлений:

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

где q''_{D_1} , q''_{D_2} , q''_o , – давление со стороны призмы волочения на перемещаемый по ножу грунт в точках D_1 , D_2 , O ; l_{D_1D} , $l_{D_2D_1}$, l_{OD_2} – длины отрезков, обозначенных индексами.

Силы остаточного сцепления C_1 , C_2 и C_3 , действующие на эти участки, определяются по формуле (1), в которую вместо длины площадки OD подставляются длины соответствующих участков.

Из условий равновесия элементов грунта, начиная с верхнего элемента, можно найти оставшиеся неизвестными силы. Для верхнего элемента D_1K_1KD

$$N_1 = \frac{G_1 \sin(\alpha + \omega_1) + T_1 \sin(\omega_1 + \rho)}{\cos \omega_1} + C_1 \quad \text{и} \quad R_1 = \frac{N_1 \cos \alpha + T_1 \sin(\alpha - \rho) - C_1 \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_1)}.$$

Для промежуточного элемента $D_2K_2K_1D_1$

$$N_2 = \frac{G_2 \sin(\alpha + \omega_2) + T_2 \sin(\omega_2 + \rho)}{\cos \omega_2} + N_1 + C_2 \quad \text{и} \quad R_2 = \frac{(N_2 - N_1) \cos \alpha + T_2 \sin(\alpha - \rho) - C_2 \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_2)}.$$

На нижний элемент грунта OBK_2D_2 дополнительно действует сила C_{OB} , затрачиваемая на преодоление сцепления по площадке сдвига OB

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

где h – толщина стружки.

Неизвестные силы E и R_3 будут равны:

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

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

Для расчета угла сдвига ψ используем метод, разработанный Е.И. Берестовым. Величина приведенного давления, действующего на площадку сдвига OB , определится так:

$$q = \frac{E}{Bh} \sin \psi + \frac{c}{\sin \rho}. \quad (2)$$

При выполнении условия

$$q \geq q_0 \frac{\sin \Delta_0}{\sin(\Delta_0 - \delta_0)} \cos \rho, \quad (3)$$

где

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

угол сдвига определяется по формуле

$$\psi' = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} - \frac{1}{2}(\Delta_0 - \delta_0) - \chi, \quad (4)$$

где

$$\chi = \frac{\ln A}{2 \operatorname{tg} \rho}; \quad A = \frac{q \sin(\Delta_0 - \delta_0)}{q_0 \sin \Delta_0 \cos \rho}.$$

Если условие (3) не выполняется, то

$$\psi' = \frac{3}{4}\pi - \frac{\rho}{2} - \frac{1}{2}(\Delta_0 - \delta_0) + \Delta_p, \quad (5)$$

где

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

где δ_p – угол отклонения приведенного давления на линии разрыва.

Решая уравнение (2) с уравнениями (4) или (5), в зависимости от выполнения условия (3), можно найти величину угла сдвига. Вычисления осуществляются итерационными методами до получения результата с требуемой точностью, т.е.

$$\psi - \psi' \leq \Delta,$$

где Δ – заданная точность расчета угла сдвига.

После определения угла сдвига окончательно становятся известными значения сил, изображенных на рисунке 1, и все размеры грунта, перемещаемого по поверхности ножа и находящегося в призме волочения.

Касательная и нормальная составляющие сопротивления резанию равны

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

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

Эти силы действуют на нож при сдвиге. После сдвига сопротивление резанию уменьшится, т.к. сила C_{OB} исчезнет. Это изменит силы R_3 и E , которые примут минимальные значения:

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

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

Изменяются и составляющие сопротивления резанию:

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

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

Амплитуда их колебаний при сдвиге будет равна:

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

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

Предложенный метод расчета определяет геометрические размеры перемещаемого плоским рабочим органом грунта и силовые параметры для случая, когда поверхность рабочего органа имеет несколько антифрикционных участков.

При резании грунта без призмы волочения используется приведенный выше метод, но силы, зависящие от призмы волочения, будут равны нулю.

Обоснование минимальной длины антифрикционного участка основано на результатах расчетов и следующих положениях (рисунок 3). Условия работы нижнего участка ножа BB' , среднего $B'B_1$ и верхнего B_1K различны. Нижний участок BB' внедряется в грунт ненарушенной структуры, средний $B'B_1$ вместе с площадкой скольжения малого сдвига $O'B'$ вытесняет призму $O'B'V_1$, а верхний – участвует в перемещении грунта на ноже.

На протяжении цикла разрушения грунта между двумя большими сдвигами длина нижнего и среднего участков ножа непрерывно меняется, поэтому длина антифрикционного участка не должна быть меньше их максимально возможной суммарной длины l_{BB_1} , зависящей от толщины стружки и угла резания.

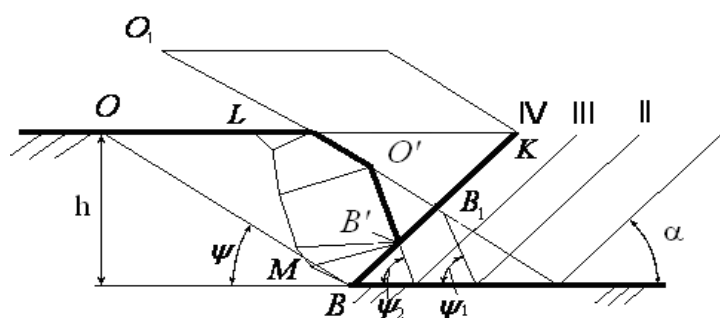


Рисунок 3. - Схема разрушения грунта при его взаимодействии с ножом

При копании грунта отвалом бульдозера параметры копания и силы, действующие на нижний элемент грунта со стороны призмы волочения и вышележащих элементов грунта, определялись по базовому методу. Так как этот метод не позволяет исследовать влияние антифрикционных участков на поверхности отвала, сделано следующее: нижний прямолинейный участок отвала разделен на два с разными углами трения грунта по ним – ω_2 и ω_3 .

Условия равновесия элементов грунта, перемещаемых по участкам с разным коэффициентом трения (рисунок 4), позволяют получить для верхней части грунта $O_1D_nK_nB_1$

$$N_{n+2} = \frac{G_{n+2} \sin(\alpha + \omega_2) + R_{n+2} \sin(\omega_2 + \rho)}{\cos \omega_2} + N_n + C_{n+2}; \quad R_{n+2}^o = \frac{(N_{n+2} - N_n) \cos \alpha + R_{n+2} \sin(\alpha - \rho) - C_{n+2} \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_2)},$$

для нижней части грунта OO_1B_1B

$$E = \frac{G_{n+3} \sin(\alpha + \omega_3) - C_{OB} \cos(\alpha + \omega_3 + \psi) + (C_{n+3} + N_{n+2}) \cos \omega_3 + R_{n+3} \sin(\omega_3 + \rho)}{\sin(\alpha + \omega_3 + \psi)},$$

$$R_{n+3}^o = \frac{E \sin(\psi + \rho) + C_{OB} \cos \psi + R_{n+3} \sin(\alpha - \rho) - N_{n+2} \cos \alpha - C_{n+3} \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_3)}.$$

Силы, входящие в эти уравнения, изображены на рисунке.

Далее рассчитываются угол сдвига и остальные параметры копания.

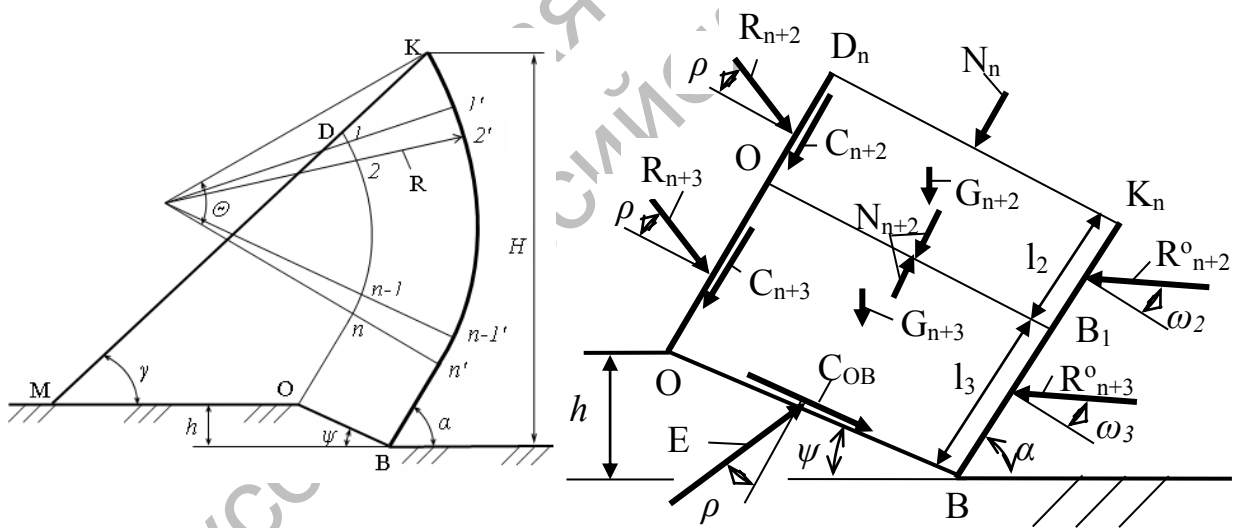


Рисунок 4. - Схемы перемещения грунта по отвалу бульдозера и антифрикционным участкам на поверхности отвала

При копании грунта ковшом скрепера с антифрикционными участками на поверхности ножа с углами внешнего трения ω_2 и ω_3 задача решалась аналогично (рисунок 5). Рассматривалась общая расчетная схема перемещения грунта по этим участкам, пригодная для трех стадий заполнения ковша: движения грунта по дну, движения по грунту и сквозь грунт в ковше. Для каждой из стадий для верхнего элемента O_1B_1KD

$$N_1 = \frac{G_2 \sin(\alpha + \omega_2) + R_{OD2} \sin(\omega_2 + \rho)}{\cos \omega_2} + N + C_{OD2}; \quad R_2 = \frac{(N_1 - N) \cos \alpha + R_{OD2} \sin(\alpha - \rho) - C_{OD2} \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_2)}$$

Для нижнего элемента OBV_1O_1

$$E = \frac{G_3 \sin(\alpha + \omega_3) - C_{OB} \cos(\alpha + \omega_3 + \psi) + (C_{OD3} + N_1) \cos \omega_3 + R_{OD3} \sin(\omega_3 + \rho)}{\sin(\alpha + \omega_3 + \rho)}$$

$$R_3 = \frac{E \sin(\psi + \rho) + C_{OB} \cos \psi + R_{OD3} \sin(\alpha - \rho) - N_1 \cos \alpha - C_{OD3} \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_3)}$$

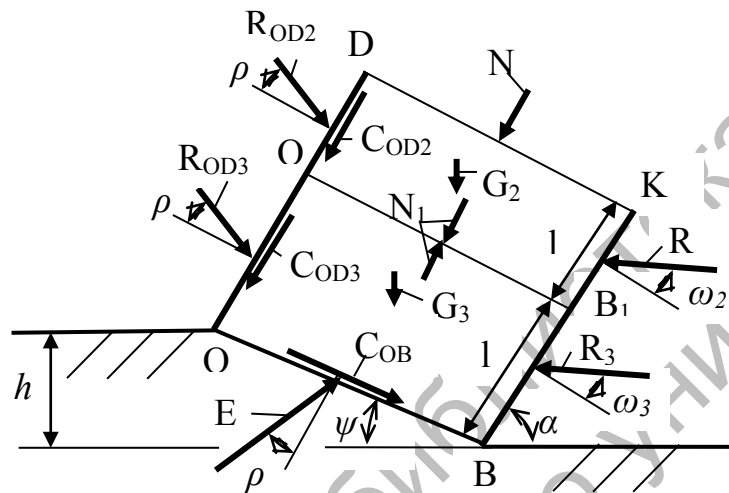
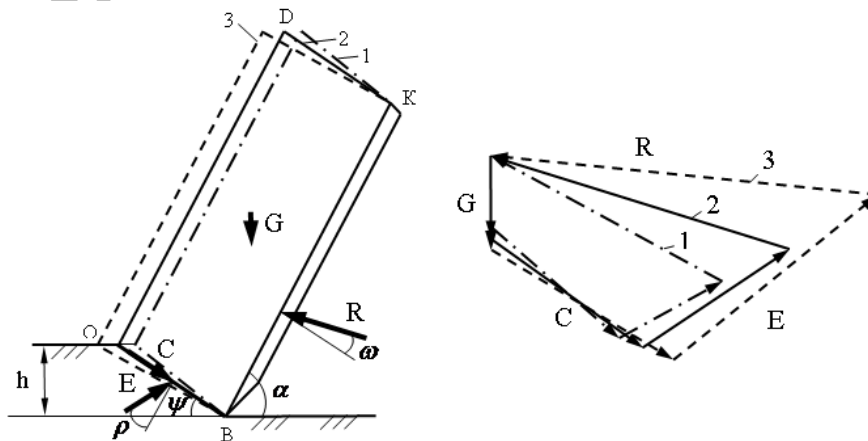


Рисунок 5. – Схема перемещения грунта по ножу скрепера с антифрикционными участками

Силы, входящие в эти уравнения, изображены на рисунке.

Расчет трех стадий заполнения ковша, угла сдвига и остальных параметров осуществлялся по базовому методу.

В третьей главе приведены результаты теоретических исследований. Изменение трения между ножом и грунтом приводит к изменению положения площадки сдвига и к изменению всех остальных параметров взаимодействия системы «нож-грунт» точно так же, как к этому приводит изменение размеров ножа, что видно из рисунка 6.



1 – при $\omega=5^\circ$; 2 – при $\omega=15^\circ$; 3 - при $\omega=25^\circ$

Рисунок 6. - Схема резания и многоугольники сил при $\alpha=60^\circ$

При исследовании влияния антифрикционных участков рассматривался грунт, характерный для условий Республики Беларусь (II-III категория по числу ударов ударника ДорНИИ). Величина угла внешнего трения грунта по металлу принималась $\omega=28^\circ$, по антифрикционному участку - $\omega=20^\circ$.

Результаты расчетов резания ножом $0,1 \times 0,1$ м с углом резания $\alpha=60^\circ$ при толщине стружки $h=0,02$ м для разных значений удельного сцепления грунта представлены на рисунке 7, из которого видно, что наиболее эффективным является нанесение покрытия у режущей кромки ножа.

Так, при $c=100$ кПа антифрикционный слой длиной всего $0,01$ м снижает силу P_1^{\max} на 20%.

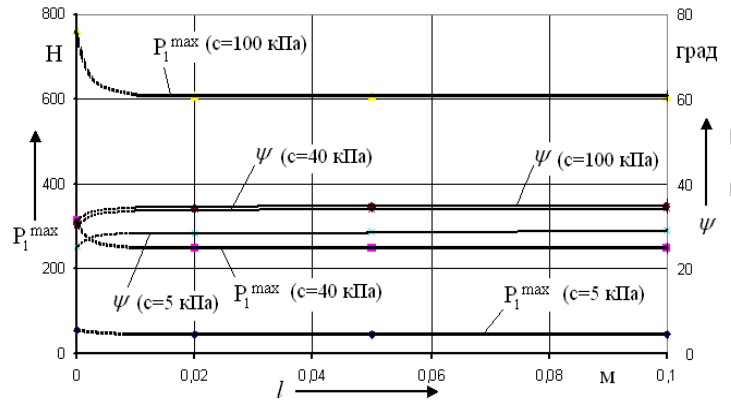


Рисунок 7. - Влияние длины l антифрикционного участка на угол сдвига ψ и касательную составляющую сопротивления резанию P_1^{\max}

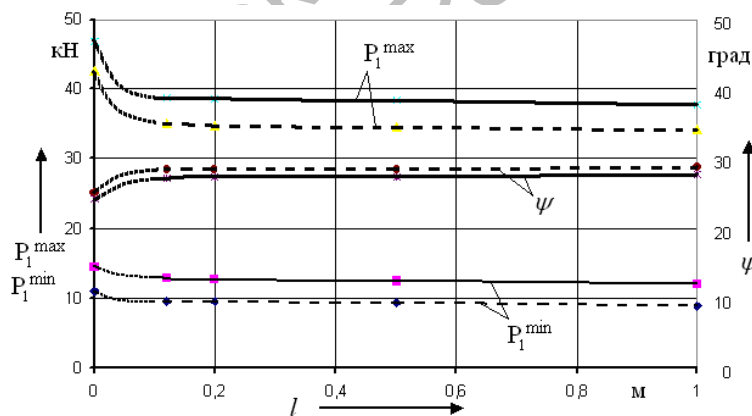
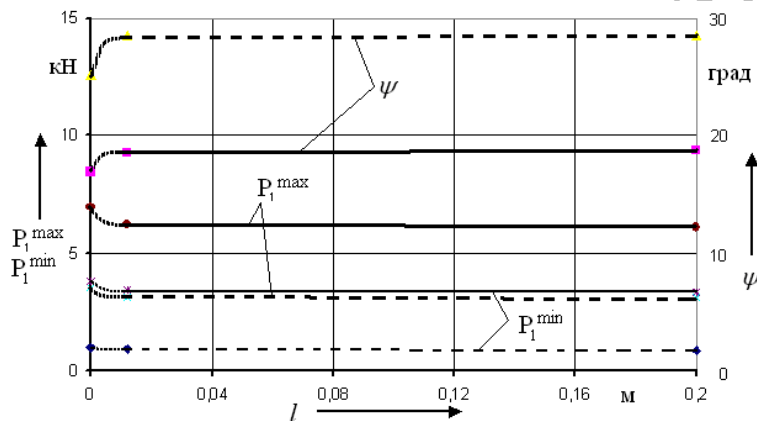


Рисунок 8. - Влияние длины l антифрикционного участка на угол сдвига ψ , экстремальные (P_1^{\max} и P_1^{\min}) значения сопротивления копания (штриховые линии – при отсутствии призмы волочения)

На рисунке 8 представлены расчеты для плоского рабочего органа 1×1 м при угле резания $\alpha=60^\circ$ и толщине стружки $h=0,02$ м и $h=0,2$ м соответственно.

Влияние призмы волочения особенно заметно при малых толщинах стружки. При толщине стружки $h=0,2$ м антифрикционный участок минимальной длины снижает силу P_1^{\max} на 18%, при $h=0,02$ м сила P_1^{\max} составляет 89% от этой же силы у ножа без покрытия.

Если вся поверхность рабочего органа будет покрыта антифрикционным слоем, то при $h=0,02$ м сила P_1^{\max} снизится на 15,5%, а при $h=0,2$ м - на 19,5%, и эти цифры будут предельны для данного типа покрытия.

Влияние длины антифрикционного участка на копание грунта отвалом бульдозера (рисунок 9) аналогично.

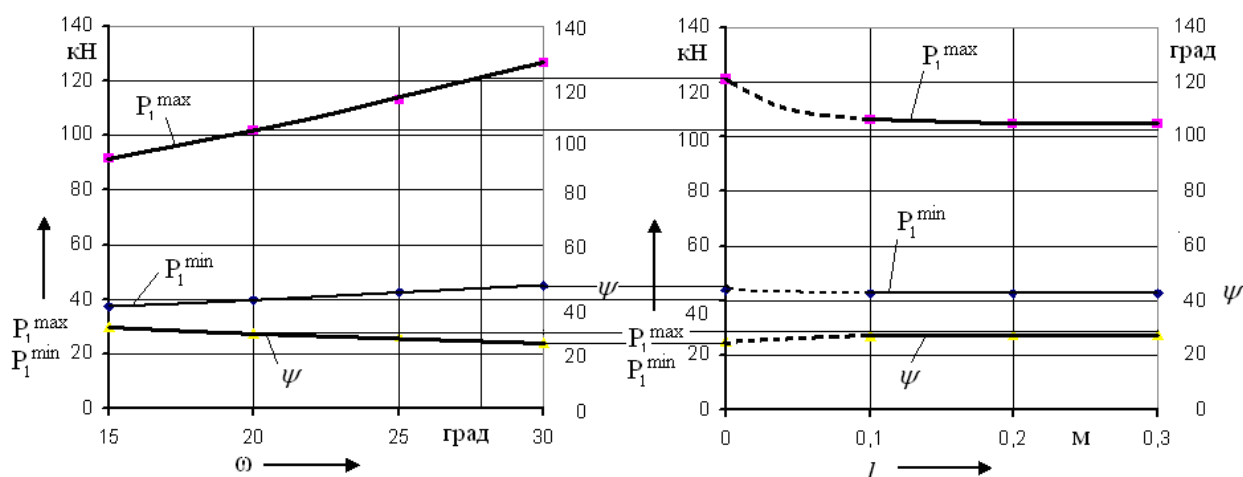


Рисунок 9. - Влияние угла внешнего трения ω и длины l антифрикционного участка (при $\omega=20^\circ$) на угол сдвига ψ , экстремальные (P_1^{\max} и P_1^{\min}) значения сопротивления копанию отвалом при толщине стружки $h=0,2$ м

При минимально возможной длине участка $l=0,1$ м сила P_1^{\max} снизится на 12,4%, при $l=0,2$ м - на 13,2%, при полностью покрытом антифрикционным слоем отвале сила P_1^{\max} составит 84,3% от силы сопротивления копанию отвалом без антифрикционного слоя. Если же верхнюю поверхность отвала покрыть антифрикционным слоем, а нижнюю часть ножей длиной 0,25 м оставить не покрытой, то в этом случае при $\omega=20^\circ$, сила P_1^{\max} уменьшится со 121 кН до 118 кН, то есть всего на 2,5%. Это подтверждает важность правильного выбора длины покрытия и его расположения.

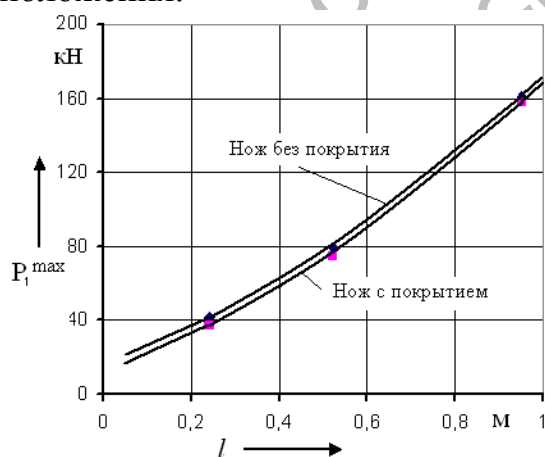


Рисунок 10. - Влияние длины l антифрикционного участка на сопротивление копанию скрепером P_1^{\max}

Оценено влияние антифрикционного участка длиной $l=0,12$ м на копание грунта скрепером (рисунок 10). Эффективность антифрикционного участка будет максимальной при малой степени заполнения ковша. Так, при $K_n=0,24$ сила P_1^{\max} уменьшается с 42,1 кН до 37,3 кН, что составляет 88,6% от начального значения. При $K_n=0,52$ сила P_1^{\max} снизится только до 93,6%, а при $K_n=0,95$ - только до 98,1% от начального значения.

Эффект от использования антифрикционного участка снижается по мере накопления призмы волочения и появления других дополнительных сопротивле-

ний, действующих на перемещаемый грунт, поэтому скрепер является машиной, наименее пригодной к использованию антифрикционных покрытий.

Для обоснования полученных выше результатов о влиянии антифрикционных участков малой длины исследован характер распределения давлений по поверхности ножа. На рисунке 11 представлены результаты расчетов давлений, действующих на участки ножа (показаны на рисунке 3), и длин этих участков.

Давление q_1 приводит к начальному разрушению грунта, давление q_2 действует в момент формирования площадки сдвига. Давление q_1' действует на участок ножа со стороны вытесняемой призмы грунта $O'B'B_1$. Давление q_3 действует на остальную поверхность ножа, по которой движется срезанный грунт.

Из рисунка 11 видно, что максимальные давления воспринимаются лишь узкой полоской ножа (нижний и средний участки ножа на рисунке 3), примыкающей к режущей кромке. По результатам исследований максимально возможная суммарная длина l_{BB1} этих участков не превышает 60% от толщины стружки при $\alpha=30^\circ$ и 50% - при $\alpha=60^\circ$. Именно этот участок поверхности ножа следует защищать от износа термообработкой или наплавкой и наносить на него антифрикционное покрытие.

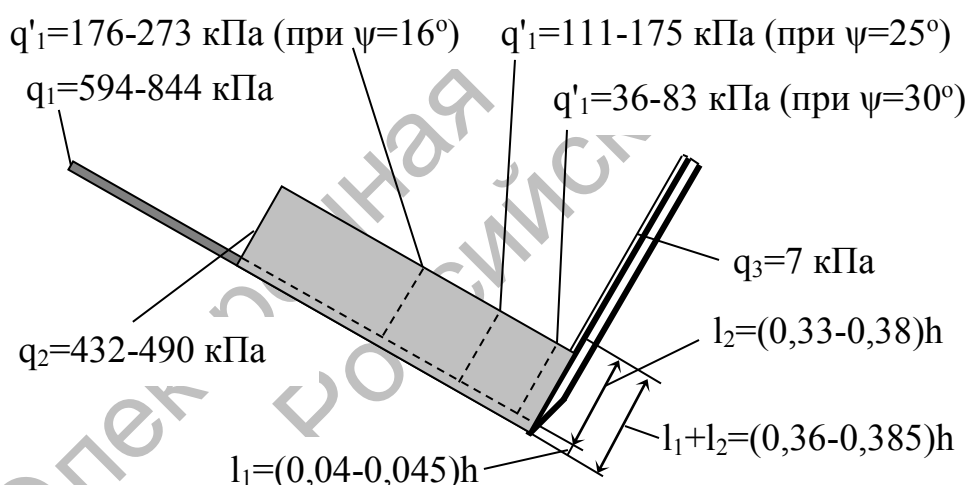


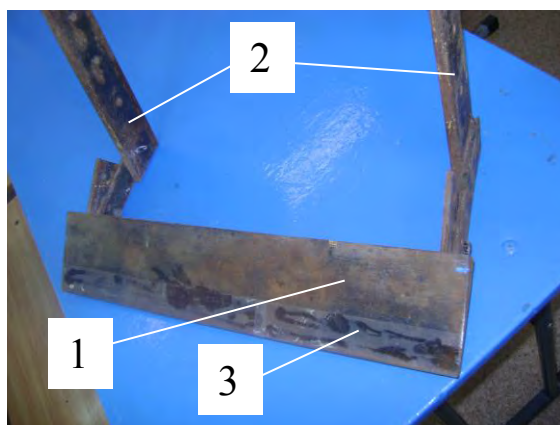
Рисунок 11. - Схема распределения давлений q_1 , q_1' , q_2 и q_3 на участках ножа при толщине стружки $h=0,2$ м

В четвертой главе дано описание лабораторной установки и ножа, используемого в процессе исследований (рисунок 12), приведена методика проведения исследований, итоги статистической обработки результатов опытов и сделан сопоставительный анализ экспериментальных данных с теоретическими.

Для исследований использовался грунтовой канал лаборатории кафедры «Строительные, дорожные, подъемно-транспортные машины и оборудование» Белорусско-Российского университета.

Для изменения коэффициента трения на поверхности ножа использовался пластик с низким коэффициентом трения $\omega=20^\circ$, который наклеивался на две сто-

роны ножа, переднюю и заднюю, а линия сгиба совпадала с режущей кромкой. Такое крепление зарекомендовало себя как достаточно надежное, и не вызвало проблем при проведении экспериментов. Изменение длины антифрикционного участка осуществлялось удалением части пластика с верхней стороны рабочей поверхности ножа.



1 – нож; 2 – стойки; 3 - антифрикционный пластик

Рисунок 12 - Испытуемый нож и его установка на измерительной тележке

Сопоставительный анализ показал, что численные значения, полученные при помощи разработанного метода расчета резания грунта ножом, имеющим антифрикционный участок, дают хорошую сходимость с экспериментальными результатами. Отклонения теоретических значений от экспериментальных результатов находятся в пределах 4,1...13,6%.

Это позволяет сделать вывод, что разработанные теоретические положения адекватны физическим процессам, происходящим при резании и копании грунта рабочими органами землеройных машин, на поверхности ножа которых имеется антифрикционный участок. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность антифрикционного слоя, расположенного у режущей кромки ножа, даже при незначительном снижении трения (всего на 6° – с $\omega=26^\circ$ до $\omega=20^\circ$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработан аналитический метод, позволяющий рассчитать параметры резания грунта плоским ножом, на поверхности которого имеются участки с разным коэффициентом трения. Метод позволяет оценить влияние антифрикционных участков на рабочий процесс как при отсутствии призмы волочения, так и при ее наличии /1-А, 3-А, 8-А, 9-А/.

2. Разработаны методы расчета параметров копания грунта рабочими органами бульдозеров и скреперов применительно к случаю, когда их ножи имеют ан-

тифрикционный участок ограниченной длины. Методы позволяют оценить влияние антифрикционного участка на рабочие процессы этих машин /5-А, 10-А/.

3. Установлено влияние трения грунта по рабочему органу на физические процессы, происходящие при взаимодействии ножа с грунтом при его послойной разработке землеройными машинами.

Снижение трения грунта о поверхность ножа приводит к уменьшению давлений на площадку сдвига, а следовательно, к увеличению угла сдвига, что уменьшает массу грунта, перемещаемого по ножу, снижает величину и амплитуду колебаний сил сопротивления резанию. Так, при резании грунта ножом при углах резания $30-60^\circ$ уменьшение угла внешнего трения с 28° до 20° приводит к увеличению угла сдвига на 6-12%, снижению на 18-20% максимальных значений сопротивления резанию /2-А, 9-А/.

4. Установлена взаимосвязь между длиной антифрикционного участка и физическими процессами, происходящими при взаимодействии ножа с грунтом при его послойной разработке землеройными машинами.

Наибольший эффект антифрикционный участок имеет в том случае, когда находится на нижней части ножа у режущей кромки. Максимальное давление на поверхность ножа у режущей кромки для углов резания $30^\circ \dots 60^\circ$ при толщине стружки 0,02...0,2 м достигает 300...850 кПа и во много раз превосходит давления на остальной поверхности (0,6...7 кПа) за пределами длины ножа, ограничивающей зону разрушения.

Использование антифрикционных участков, например на всей поверхности отвала бульдозера, не дает ощутимого эффекта по сравнению с антифрикционным участком у режущей кромки. Так, уменьшение угла внешнего трения с 28° до 20° на всей поверхности отвала увеличивает на 11,2% угол сдвига и снижает на 13,3-15,7% сопротивление копанию. Антифрикционный участок длиной 0,1 м, расположенный у режущей кромки, увеличивает угол сдвига на 8,2% и снижает сопротивление на 7,7-12,4%. Это означает, что длина антифрикционного участка, составляющая всего 7,5% от высоты отвала, уступает эффективности полностью покрытого отвала всего 3,3-5,6% /4-А, 5-А, 8-А 10-А/.

5. Установлено, что минимальная длина антифрикционного слоя практически определяется толщиной срезаемой стружки. При угле резания 30° она не должна быть меньше 60% от толщины стружки, а при угле резания 60° - 50%. Эти значения пригодны для всех типов рабочих органов /3-А, 5-А, 8-А, 9-А/.

6. Значительные по величине сопротивления перемещающегося по отвалу грунта из-за трения о призму волочения или грунта внутри ковша из-за трения о грунт в ковше и боковые стенки ковша снижает эффективность антифрикционных слоев по сравнению с резанием грунта. По этим причинам наименьшую эффективность антифрикционные участки, нанесенные на поверхность ножа у режущей

кромки, будут иметь у скрепера. По мере заполнения ковша ими обеспечивается снижение силы P_1^{\max} на 11,4% в начальной стадии, 6,4% - в промежуточной стадии и 1,9% - в заключительной стадии копания при уменьшении угла внешнего трения с 28° до 20° /5-А, 8-А, 10-А/.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные методы расчета рабочих процессов машин с плоскими ножами, бульдозеров и скреперов для случая, когда их ножи имеют антифрикционный участок ограниченной длины, могут использоваться в специализированных конструкторских отделах предприятий, разрабатывающих оборудование машин для земляных работ.

Таковыми предприятиями в Республике Беларусь являются Минский завод ОАО Амкодор-Ударник, Филиал ОАО «БЕЛАЗ»-ХОЛДИНГ» - «Могилевский автомобильный завод имени С. М. Кирова» и др., в Исламской Республике Иран - фирма Heavy Equipment Production CO «Нерсо».

Результаты работы используются в учебном процессе кафедры СДПТМиО ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» при проведении лабораторных занятий и в дипломном проектировании.

Методы расчета заглубления отвала бульдозера и рекомендации по усовершенствованию конструкции приняты для использования фирмой Vulkan Alborz со.Ltd (Исламская Республика Иран).

По материалам работы предложены способ и устройство для его осуществления, защищенные патентом на изобретение /7-А/, позволяющие наносить возобновляемый антифрикционный слой на нижнюю часть поверхности ножа. Разработана конструкция ножей, защищенная патентом на полезную модель /6-А/. Рабочая поверхность ножа этой конструкции имеет меньший коэффициент трения за счет изменения характера термообработки ножа, что приводит к сомозатачиванию режущей кромки и снижает сопротивление при разработке грунта.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Монографии

1. Берестов, Е.И. Взаимодействие рабочего оборудования и гусеничных траков землеройных машин с грунтом : монография / Е.И.Берестов, А.В.Кулабухов, А.П.Смоляр, А.Х.Афгами Алишах, Э.Х.Джалилванд. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – 184 с.

Статьи

2. Берестов, Е.И. Влияние трения грунта на поверхности ножа на сопротивление резанию / Е.И.Берестов, А.П.Смоляр, А.Х.Афгами Алишах, Э.Х.Джалилванд // Строительные и дорожные машины. – 2010. - №11. - С. 34-38.

3. Берестов, Е.И. Резание грунта ножом с антифрикционным покрытием / Е.И.Берестов, А.Х.Афгами Алишах, Э.Х.Джалилванд // Механизация строительства. – 2011. - №3. - С. 6-9.

4. Берестов, Е.И. Перспективы использования антифрикционных покрытий рабочих органов машин для земляных работ / Е.И.Берестов, А.Х.Афгами Алишах // Строительная наука и техника. – 2012. - №2 (41). – С. 67-71.

5. Берестов, Е.И. Исследование влияния антифрикционных слоев на резание и копание грунта землеройными машинами / Е.И.Берестов, А.Х.Афгами Алишах // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2014. - № 3 (44). – С. 6 – 13.

Материалы конференций

6. Берестов, Е.И. Распределение давлений по поверхности ножа при резании грунта / Е.И.Берестов, А.Х.Афгами Алишах, Э.Х.Джалилванд // Интерстроймех – 2011: Материалы междунар. науч.-техн. конф. - Могилев, 2011. – С. 26-29.

Тезисы докладов

7. Берестов, Е.И. Резание грунта ножом с антифрикционным покрытием / Е.И.Берестов, А.Х.Афгами Алишах, Э.Х.Джалилванд // Интерстроймех – 2010: Материалы междунар. науч.-техн. конф. - Белгород, 2010. – Т. 1. - С. 54.

8. Афгами Алишах, А.Х. О перспективах использования антифрикционных покрытий при резании грунта / А.Х.Афгами Алишах // Интерстроймех – 2011: Материалы междунар. науч.-техн. конф. - Могилев, 2011. – С. 13.

Патенты

9. Рабочее оборудование землеройной машины : пат. 9000 Респ. Беларусь, МПК Е 02 F 3.64 / Е.И.Берестов, А.Х.Афгами Алишах, Э.Х.Джалилванд ; заявитель Бел.-Рос. Ун-т. - № и 20120718; заявл. 26.07.2012.

10. Способ разработки грунта и машина для его осуществления : пат. 16467 Респ. Беларусь, МПК Е 02F 3/00 / Е.И.Берестов, А.П.Смоляр, А.Х.Афгами Алишах, Э.Х.Джалилванд ; заявитель Бел.-Рос. Ун-т. - № а 20101199 ; заявл. 06.08.2010.

РЭЗІЮМЭ

Афхамі Алішах Аліасгар Хасан

ЗНІЖЭННЕ СУПРАЦІЎЛЕННЯЎ ПРЫ РАСПРАЦОЎЦЫ ГРУНТУ ЗА КОШТ ПАМЯНШЭННЯ ТРЭННЯ НА РЭЖУЧЫХ ЧАСТКАХ ЗЕМЛЯРЫЙНЫХ МАШЫН

Ключавыя словы: супраціўленне грунта рэзанню і капанню, уплыў знешняга трэння, антыфрыкцыйны пласт, метады разліку, даўжыня антыфрыкцыйнага пласту.

Мэта даследавання: абгрунтаванне параметраў антыфрыкцыйных пластоў на рэжучых частках землярыйных машын, зніжаючых супраціўленне грунту пры яго распрацоўцы.

Стварэнне аналітычнага метаду разліку грунтавалася на сучасных уяўленнях пра механіку разбурэння грунту пры яго рэзанні і капанні. Лабараторныя даследаванні праводзіліся ў грунтавым канале кафедры «Будаўнічыя, дарожныя, пад'ёмна-транспартныя машыны і абсталяванне» Беларуска-Расійскага ўніверсітэта.

Навуковая навізна атрыманых вынікаў. Распрацаваны аналітычны метады, пры дапамозе якога забяспечваецца разлік параметраў рэзання грунту плоскім нажом, які мае на паверхні некалькі антыфрыкцыйных пластоў з розным каэфіцыентам трэння, што дазваляе ацаніць іх уплыў на рабочы працэс.

Распрацаваны метады разліку рабочых працэсаў бульдозераў і скрэпераў, нажы якіх маюць антыфрыкцыйныя пласты абмежаванай даўжыні, што дазваляе ацаніць іх уплыў на рабочыя працэсы гэтых машын.

Абгрунтаваны выбар мінімальнай даўжыні антыфрыкцыйнага пласту, якая не павінна быць меншая за 60% ад таўшчыні стружкі пры вуглу рэзання $\alpha=30^\circ$, і 50% - пры $\alpha=60^\circ$, што дазволіць знізіць выдаткі матэрыялаў і энергіі пры яго вырабе.

Атрыманы рэкамендацыі па выкарыстанню антыфрыкцыйных пластоў на нажах машын з плоскім, адвальным і каўшовым працоўным органам, якія паказалі, што найменшую эфектыўнасць антыфрыкцыйны пласт будзе мець ў скрэпера з-за павелічэння супраціўлення ў каўшы (11,5...2% ў залежнасці ад ступені запаўнення каўша).

Распрацаваныя метады разліку могуць выкарыстоўвацца пры праектаванні рабочага абсталявання землярыйных машын для аптымізацыі параметраў антыфрыкцыйных пластоў на паверхні рэжучых элементаў.

Вобласць прымянення. Рабочае абсталяванне землярыйных машын.

РЕЗЮМЕ

Афхами Алишах Алиасгар Хасан

СНИЖЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГРУНТА ЗА СЧЕТ УМЕНЬШЕНИЯ ТРЕНИЯ НА РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ РАБОЧЕГО ОРГАНА

Ключевые слова: сопротивление грунта резанию и копанию, влияние внешнего трения, антифрикционный слой, метод расчета, длина антифрикционного слоя.

Цель исследования: обоснование параметров антифрикционных участков на режущих элементах землеройных машин, снижающих сопротивление грунта при его разработке.

Создание аналитического метода расчета базировалось на современных представлениях механики разрушения грунта при его резании и копании. Лабораторные исследования проводились в грунтовом канале кафедры «Строительные, дорожные, подъемно-транспортные машины и оборудование» Белорусско-Российского университета.

Научная новизна полученных результатов. Разработан аналитический метод, обеспечивающий расчет параметров, характеризующих резание грунта плоским ножом, имеющим на рабочей поверхности несколько антифрикционных участков с разным коэффициентом трения, позволяющий оценить влияние антифрикционных участков на рабочий процесс.

Разработаны методы расчета рабочих процессов бульдозеров и скреперов, оснащенных ножами, на поверхности которых имеются антифрикционные участки ограниченной длины, позволяющие оценить их влияние на рабочие процессы этих машин.

Обоснован выбор минимальной длины антифрикционного участка, которая не должна быть меньше 60% от толщины стружки при угле резания $\alpha=30^\circ$, и 50% - при $\alpha=60^\circ$, что позволит снизить затраты материалов и энергии при изготовлении.

Обоснованы рекомендации по использованию антифрикционных участков на ножах машин с плоским, отвальным и ковшовым рабочим органом, показывающие, что наименьшую эффективность антифрикционный участок будет иметь у скрепера из-за значительного увеличения сопротивлений перемещению грунта внутри ковша (11,5...2% в зависимости от степени заполнения ковша).

Разработанные методы расчета могут использоваться при проектировании рабочих органов землеройных машин для оптимизации параметров антифрикционных участков на поверхности режущих элементов.

Область применения. Рабочее оборудование землеройных машин.

ABSTRACT

Afkhami Alishah Aliasghar Hassan

REDUCTION OF RESISTANCES IN EARTHWORKS DUE TO THE DECREASE OF FRICTION ON CUTTING ELEMENTS OF EARTHMOVING MACHINES

Keywords: soil resistance to cutting and digging, effect of external friction, anti-friction layer, method of calculation, length of antifriction layer.

Objective of the research: to substantiate the parameters of antifriction sections on cutting elements of earthmoving machines, which reduce soil resistance in earthworks.

The development of the analytical method of calculation was based on modern concepts of mechanics of soil fracture in the process of soil cutting and digging. Laboratory studies were held in the soil canal of the Construction, Road Construction and Jack Transporting Machines department of Belarusian-Russian University.

Scientific novelty of the obtained results. The analytical method has been developed to calculate the parameters which characterize soil digging by using a straight blade, the operating surface of which has several antifriction sections with different coefficients of friction, and to assess the impact of antifriction sections on the operating procedure.

Methods have been developed for the calculation of operating procedures of bulldozers and scrapers equipped with the blades, surfaces of which have antifriction sections of a limited length, their impact on the working procedure of these machines being assessed.

The selection of the minimum length of an antifriction section has been substantiated, and it should not be less than 60% of the chip thickness at a cutting angle $\alpha=30^\circ$ and 50% at $\alpha=60^\circ$ which reduces materials and power consumption in their manufacture.

The sound recommendations have been made for the use of antifriction sections in the blades of machines with a straight, mouldboard and bucket-type operating element, which show that a scraper will have the least efficient antifriction section due to a considerable increase of resistances to soil movement inside the bucket (11.5...2% depending on the degree of bucket fill).

The calculation methods developed can be used to design operating members of earth-moving machines to optimize the parameters of antifriction sections on the surface of cutting elements.

Area of application. Operational equipment of earth-moving machines.

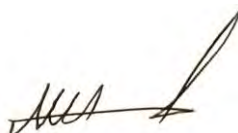
Научное издание

АФХАМИ АЛИШАХ Алиасгар Хассан

СНИЖЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГРУНТА
ЗА СЧЕТ УМЕНЬШЕНИЯ ТРЕНИЯ НА РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ
ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 05.05.04 - дорожные, строительные
и подъемно-транспортные машины

 Афхами Алишак А