

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ СЛОЕВ НА РЕЗАНИЕ И КОПАНИЕ ГРУНТА ЗЕМЛЕРОЙНЫМИ МАШИНАМИ

Приведены результаты исследований влияния антифрикционного слоя на резание и копание грунта землеройными машинами. Исследовано влияние длины антифрикционного слоя на сопротивление копанию и угол сдвига для ножа, плоского рабочего органа, отвала бульдозера и ковша скрепера. Установлено, что эффективность антифрикционного слоя зависит от типа машины. Подтверждена перспективность использования антифрикционных слоев.

Землеройная машина, трение рабочего органа, антифрикционный слой, эффективность, исследования

Проведенные исследования /1/ достаточно убедительно показывают, что следует уделять очень серьезное влияние проблеме снижения трения между грунтом и рабочим органом землеройной машины. Изменение трения между ножом и грунтом приводит к изменению параметров, характеризующих взаимодействие системы «нож-грунт», аналогично тому, как к этому приводит изменение геометрических размеров ножа. Например, трение влияет на угол сдвига  $\alpha$ , следовательно, на массу перемещаемого по ножу грунта, изменяет положение сил, действующих между ножом и грунтом, и т.д.

Исследованиями Ю.И.Густова /2/ установлено, что коэффициент трения грунта по металлу при резании существенно зависит от материала ножа и его термообработки, материала электродов, используемых для износостойкой наплавки.

Следовательно, за счет правильного выбора материала и его термообработки, применения специальных покрытий или иных конструктивных способов снижения трения, силу сопротивления резанию можно значительно уменьшить.

Для оценки эффективности конструктивных способов снижения трения между ножом и грунтом разработаны аналитические методы расчета /3, 4/.

Далее приведены результаты исследований, полученные при помощи этих методов. Необходимость проведения таких исследований вытекает из технологических и экономических соображений, которые сводятся к одной проблеме – проблеме выбора рациональной длины слоя антифрикционного покрытия, поскольку очень вероятно, что оно может быть дорогим.

Рассмотрен грунт II-III категории (по числу ударов ударника ДорНИИ), характерный для строительных площадок Республики Беларусь, со следующими физико-механическими свойствами:

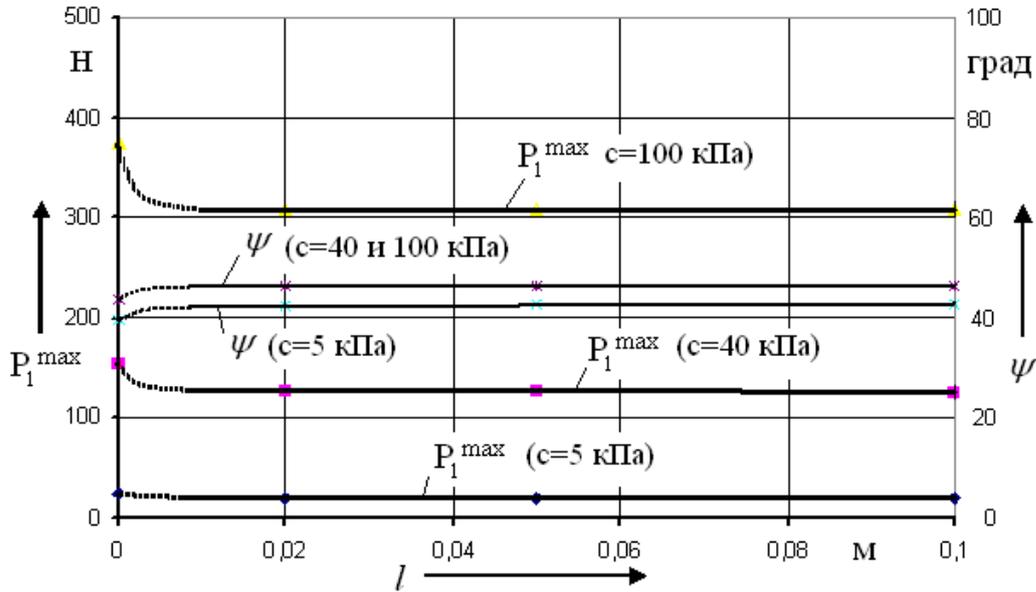
- $\rho = 30^\circ$  – угол внутреннего трения;
- $\omega = 28^\circ$  - угол внешнего трения по ножу без антифрикционного слоя;
- $\rho_s = 1,6 \text{ т/м}^3$  – плотность грунта;
- $c = 40 \text{ кПа}$  – удельное сцепление грунта.

В некоторых случаях дополнительно рассмотрен грунт при других значениях удельного сцепления. Это позволило оценить влияние трения на разных категориях грунта, от I (при  $c=5$ ) кПа до IV (при  $c=100$  кПа).

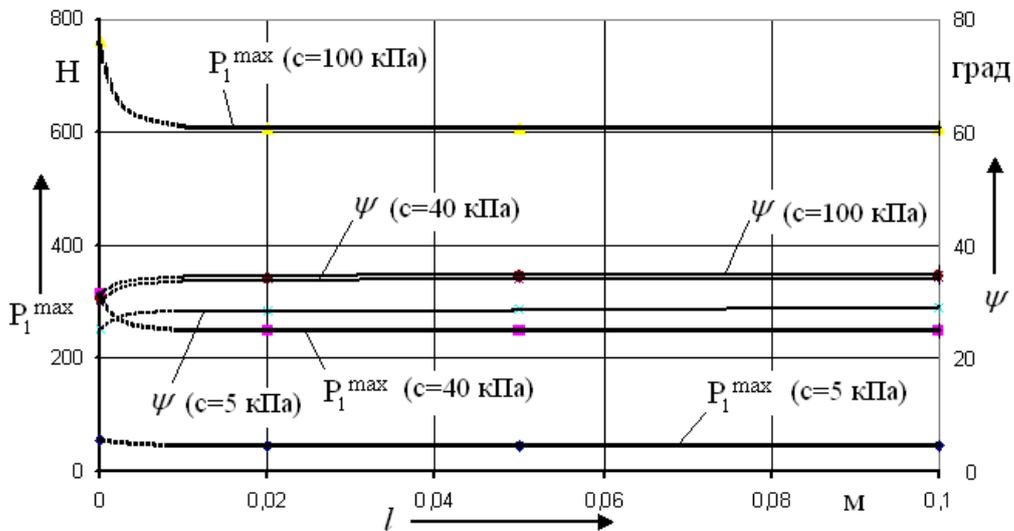
Величина угла внешнего трения грунта по антифрикционному слою принята равной  $\omega=20^\circ$  исходя из того, что она может быть достигнута методами термообработки и наплавки или правильным выбором металла без особых трудностей /2/.

### Влияние антифрикционного слоя на резание грунта

На рис. 1 представлены результаты расчета резания грунта ножом с размерами:  $B=0,1$  м – ширина ножа;  $l=0,1$  м – длина ножа, при толщине стружки  $h=0,02$  м для двух значений угла резания  $\alpha=30^\circ$  и  $\alpha=60^\circ$ . Эти значения близки к углам резания, под которыми установлены режущие элементы землеройных машин.



а)



б)

а - для угла резания  $\alpha=30^\circ$ ; б - для  $\alpha=60^\circ$

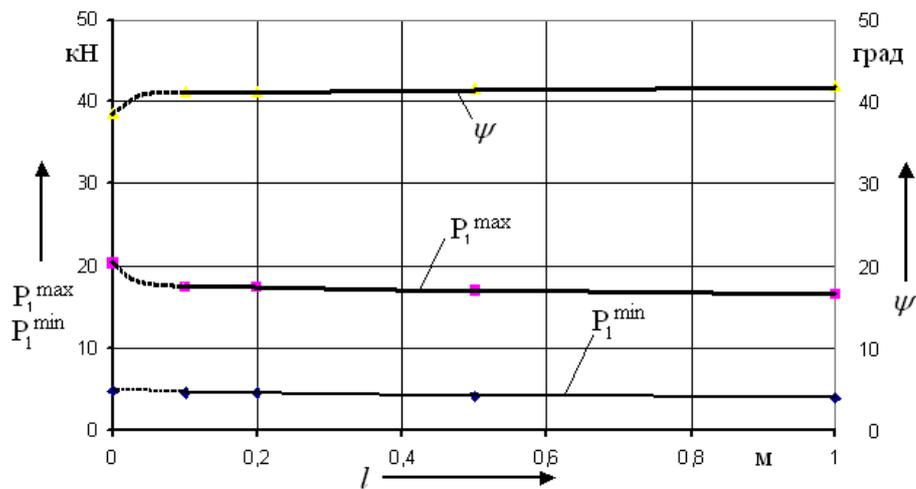
**Рисунок 1 - Влияние длины  $l$  антифрикционного слоя на угол сдвига  $\psi$  и максимальное  $P_1^{\max}$  значение касательной составляющей сопротивления резанию при разных значениях удельного сцепления грунта**

Из рисунка 1 видно, что наиболее эффективным является нанесение покрытия непосредственно у режущей кромки ножа. Так, если антифрикционное покрытие нанесено на длину 0,012 м, считая от режущей кромки, то снижение силы  $P_1^{\max}$  при удельном сцеплении грунта  $c=40$  кПа составит 83% для угла резания  $\alpha=30^\circ$  и 80% для угла резания  $\alpha=60^\circ$ .

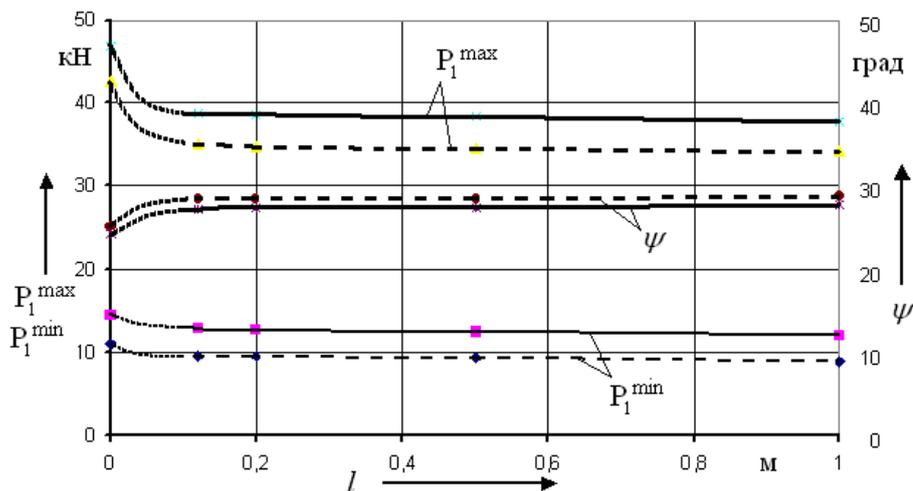
Эти результаты практически такие же, как и при нанесении антифрикционного слоя по всей длине ножа.

Для угла резания  $\alpha=30^\circ$  максимальные значения касательной составляющей сопротивления резанию  $P_1^{\max}$  снижаются антифрикционным слоем той же длины до 84,6% при  $c=5$  кПа и 82% при  $c=100$  кПа, а для угла резания  $\alpha=60^\circ$  - до 82,6% при  $c=5$  кПа и до 80% при  $c=100$  кПа.

Исследовано резание грунта плоским рабочим органом, установленным под теми же углами резания, но с размерами  $B=1$  м и  $l=1$  м (рис. 2) при толщине стружки  $h=0,2$  м и  $c=40$  кПа. При резании таким ножом, установленным под углом  $\alpha=60^\circ$ , образуется призма волочения, влияние которой учтено /4/. Резание плоским рабочим органом близко к процессам копания отвалом и ковшом скрепера. Но более простые условия движения грунта по ножу и более простая расчетная схема позволяют легче его исследовать.



а)



б)

а - для угла резания  $\alpha=30^\circ$ ; б - для  $\alpha=60^\circ$

**Рисунок 2 - Влияние длины  $l$  антифрикционного слоя на угол сдвига  $\psi$ , максимальное  $P_1^{\max}$  и минимальное  $P_1^{\min}$  значения касательной составляющей сопротивления резанию при наличии призмы волочения (сплошные линии) и ее отсутствии (штриховые линии)**

Из рисунка 2,а видно, что влияние антифрикционного слоя остается прежним. Так, слой минимальной длины увеличивает угол сдвига на 6%, снижает силу  $P_1^{\max}$  до 85% по сравнению с ножом без такого покрытия. Это несколько хуже, чем при резании такого же грунта ножом с малыми размерами, и объясняется перемещением по поверхности ножа большой массы грунта.

Рассмотрим (рис. 2,б) результаты для случая, когда нож установлен под углом резания  $\alpha=60^\circ$ . Влияние призмы волочения существенно сказывается на параметрах, характеризующих процесс резания, что видно из рисунка (результаты, представленные на этом рисунке для случая, когда отсутствует призма волочения, получены условно).

Однако общий характер влияния антифрикционного слоя остается одинаковым как при наличии, так и при отсутствии призмы волочения. Антифрикционный слой минимальной длины увеличивает угол сдвига на 13% и снижает силу  $P_1^{\max}$  до 82% по сравнению с ножом без покрытия. Если вся поверхность ножа будет покрыта антифрикционным слоем, то сила  $P_1^{\max}$  снизится до 80,5%, но при этом длина слоя при толщине стружки  $h=0,2$  м увеличится с 0,1 м до 1 м, т.е. в 10 раз.

Для обоснования минимальной длины антифрикционного слоя использованы специальные методы расчета, рассматривающие цикл разрушения грунта ножом между двумя соседними большими сдвигами. На основании этих расчетов установлено, что минимальная длина антифрикционного слоя определяется толщиной срезаемой стружки. При  $\alpha=30^\circ$  она не должна быть меньше 60% от толщины стружки, а при  $\alpha=60^\circ$  - 50%. Эти значения пригодны для всех типов рабочих органов землеройных машин /5/.

Несмотря на то, что общий характер влияния антифрикционного слоя остается одинаковым во всех рассмотренных выше случаях, полученные результаты нельзя автоматически переносить на процесс копания. При копании отвалом или ковшем сопротивление перемещению срезанного грунта, движущегося по поверхности отвала или сквозь грунт внутри ковша, все более увеличивается, и будет играть более существенную роль.

### Влияние антифрикционного слоя на копание грунта бульдозером

На рис. 3,а представлены результаты расчетов влияния угла внешнего трения на параметры процесса копания для случая, когда поверхность отвала имеет антифрикционное покрытие по всей длине. На рис. 3,б – влияние длины антифрикционного покрытия при копании грунта с толщиной  $h=0,2$  м для двух случаев - при  $\omega=20^\circ$  и  $\omega=28^\circ$ .

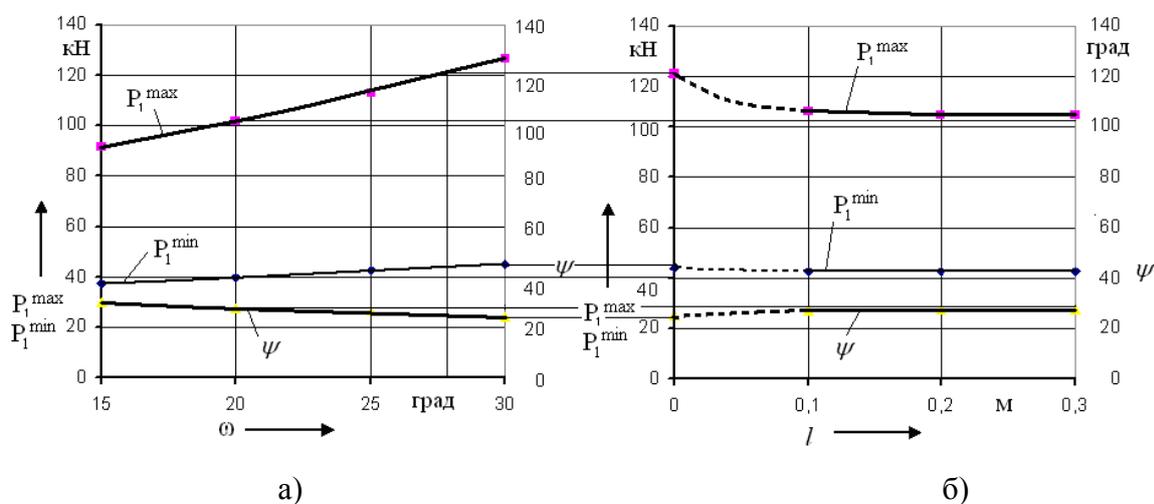


Рисунок 3 - Влияние угла внешнего трения (а) и длины  $l$  антифрикционного слоя (б) на угол сдвига  $\psi$ , максимальное  $P_1^{\max}$  и минимальное  $P_1^{\min}$  значения касательной составляющей сопротивления копанию отвалом бульдозера

Значительные по величине сопротивления перемещению грунта по криволинейной поверхности отвала и влияние на них призмы волочения приводят к значительному увеличению силы  $P_1^{\min}$ , действующей после сдвига грунта. Эта сила составляет 35-41% от силы  $P_1^{\max}$  при копании с толщиной стружки  $h=0,2$  м. Это значительно выше, чем для плоского рабочего органа при  $\alpha=60^\circ$  (26-31% при той же толщине стружки). Это свидетельствует о том, что доля сопротивлений, не зависящих от ограниченного по длине антифрикционного покрытия, увеличивается.

Вследствие этого сопоставим результаты, полученные при минимально возможной длине антифрикционного покрытия  $l=0,1$  м, и полностью покрытом отвале.

У покрытого антифрикционным слоем отвала угол сдвига увеличится по сравнению с отвалом без покрытия на 11,2%, при длине покрытия  $l=0,2$  м на 9%, а при  $l=0,1$  м – на 8,2%. Сила  $P_1^{\max}$  при этом уменьшится в первом случае до 84,3%, при  $l=0,2$  м – до 86,8% и при  $l=0,1$  м – до 87,6%.

Такие результаты свидетельствуют о том, что антифрикционный слой существенно влияет на сопротивление копании (при минимальной длине слоя снижение силы  $P_1^{\max}$  на 12,4%). Кроме того, увеличение длины антифрикционного слоя свыше минимального значения не является целесообразным. Так, при увеличении длины слоя в 2 раза (с 0,1 м до 0,2 м) снижение силы  $P_1^{\max}$  составит только 13,2%.

Интересные результаты, подтверждающие сказанное выше, получены для случая, когда нижняя часть ножей длиной 0,25 м остается не покрытой, а вся остальная поверхность отвала покрыта антифрикционным слоем при  $\omega=20^\circ$ . В этом случае угол сдвига увеличится по сравнению с отвалом без покрытия всего на  $0,6^\circ$  (с  $25,1^\circ$  до  $25,7^\circ$ ) или на 2,4%, а сила  $P_1^{\max}$  уменьшится с 121 кН до 118 кН, то есть, всего на 2,5%.

Это подтверждает важность правильного выбора минимальной длины покрытия. Поскольку копание при максимальной величине призмы волочения и толщине стружки  $h=0,2$  м является предельным для наиболее распространенного бульдозера на базе трактора Т-10М, то и рекомендуемая для этого случая минимальная длина антифрикционного слоя  $l=0,1$  м будет пригодна и при меньших толщинах стружки.

Таким образом, подтвердились предыдущие результаты, полученные при резании грунта плоским ножом. Их смысл сводится к тому, что снижение трения в нижней части ножа наиболее целесообразно. Поэтому антифрикционный слой у бульдозера достаточно наносить только на нижнюю часть ножа у режущей кромки, или на весь нож, учитывая его перестановку другой стороной при износе нижней кромки, оставив поверхность отвала без изменений.

Эффект от использования антифрикционного слоя снижается по мере накопления призмы волочения, когда появляются значительные дополнительные сопротивления как на поверхности отвала, так и вне ее (от призмы волочения).

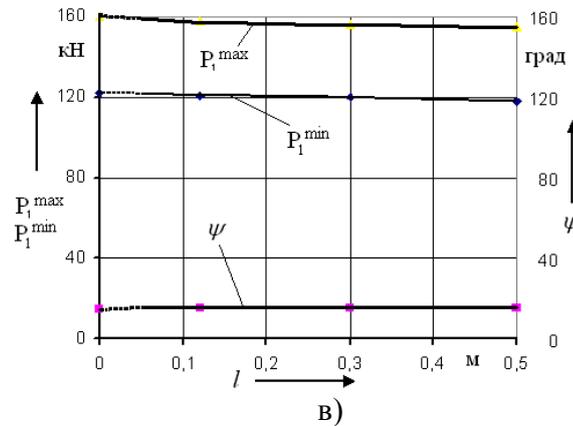
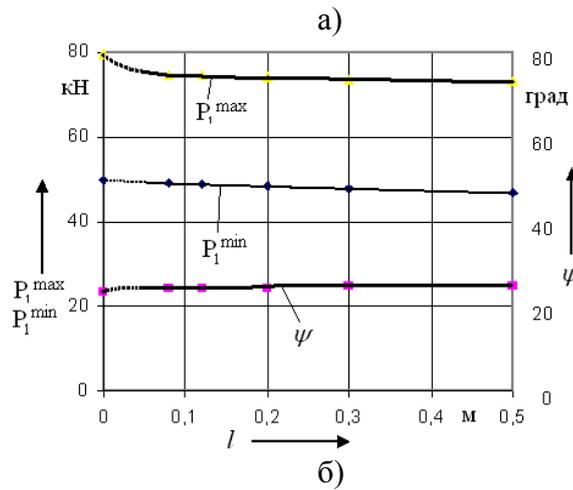
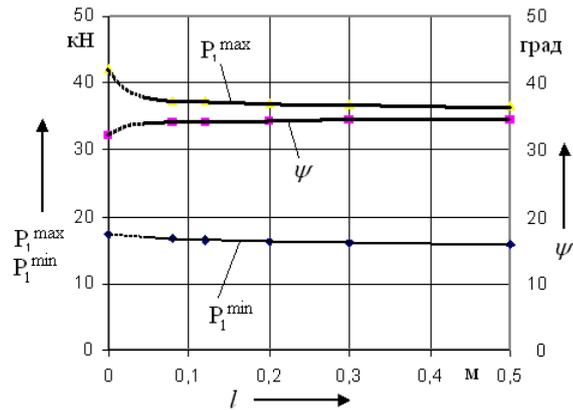
### **Влияние антифрикционного слоя на копание грунта скрепером**

За базовую машину принят скрепер МоАЗ-6014. Особенности конструкции ковша скрепера позволяют наносить антифрикционный слой только на поверхность ножа и подножевой плиты. Снижение сил трения на боковых стенках ковша не имеет оснований ввиду малости этих сил.

Если учесть, что грунт в ковше движется по поверхности набранного ранее грунта, которая играет роль отвала, а при большой степени заполнения и вообще движется сквозь грунт в ковше, то можно сделать заключение, что применительно к скреперу снижение трения между грунтом и рабочим органом будет наименее эффективно. Причиной этого являются большие дополнительные сопротивления, действующие вне зоны контакта грунта с антифрикционным слоем.

Это подтверждается результатами вычислений. Из рисунка 4 видно, что антифрикционный слой длиной  $l=0,12$  м будет наиболее эффективным при малой степени заполнения ковша, когда силы, препятствующие движению грунта в ковше, будут минимальны.

Так, при коэффициенте наполнения  $K_n=0,24$ , сила  $P_1^{\max}$  уменьшается с 42,1 кН до 37,3 кН, что составляет 88,6% от начального значения. При  $K_n=0,52$  это же покрытие снижает силу  $P_1^{\max}$  только до 93,6% (с 79,6 кН до 74,5 кН). При  $K_n=0,95$  эффективность антифрикционного покрытия еще ниже. Сила  $P_1^{\max}$  в данном случае снижается только до 98,1% от начального значения (со 161 кН до 158 кН).



а - при степени заполнения ковша  $K_n=0,24$ ; б - при  $K_n=0,52$ ; в - при  $K_n=0,95$

**Рисунок 4 - Влияние длины  $l$  антифрикционного слоя на угол сдвига  $\psi$ , максимальное  $P_1^{\max}$  и минимальное  $P_1^{\min}$  значения касательной составляющей сопротивления копанью ковшем скрепера**

Полученные результаты позволяют оценить эффективность антифрикционного слоя, нанесенного на нижнюю часть ножей скрепера, на процесс копания.

Таким образом, скрепер можно считать машиной, наименее пригодной к использованию антифрикционного слоя на нижней части ножей по сравнению с бульдозером и другими машинами, режущими грунт.

### **Заключение**

Исследования подтвердили, что одним из перспективных направлений совершенствования режущих элементов рабочих органов землеройных машин является устройство на их режущей части антифрикционного слоя. Такой слой может быть получен правильным выбором износостойкого металла для наплавки и его термообработки, или изготавливаться из современных прочных антифрикционных материалов на основе керамики и других материалов.

Расчет сопротивлений, возникающих при разработке грунта таким ножом, и выбор рациональной длины такого покрытия можно осуществить при помощи методов расчета и программного обеспечения, разработанных авторами /3, 4/.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. 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.
2. Густов, Ю.И. Триботехника строительных машин и оборудования / Ю.И. Густов. – Москва: МГСУ, 2011. – 192 с.
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. 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.