

УДК (UDC) 624.131.533

ВЛИЯНИЕ ГРАВИЙНО-ГАЛЕЧНИКОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА  
ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ С УЧЕТОМ ИЗНОСА  
РЕЗЦОВ ТРАНШЕЕКОПАТЕЛЕЙINFLUENCE OF GRAVEL-PEBBLE INCLUSIONS ON THE PROCESS OF  
CUTTING FROZEN SOILS TAKING INTO ACCOUNT THE WEAR OF  
CUTTERS OF TRENCHERSКравченко С.М., Слепченко В.А.  
Kravchenko S.M., Slepchenko V.A.Томский государственный архитектурно-строительный университет (Томск, Россия)  
Tomsk State University of Architecture and Building (Tomsk, Russian Federation)

**Аннотация.** Неоднородные мерзлые и прочные грунты значительно сокращают жизненный цикл режущего инструмента траншеекопателей вследствие повышенной динамичности процесса резания и роста контактного давления на площадке износа. В работе представлен подход в определении сопротивлений на площадке износа резцов, позволяющий с необходимой точностью учесть влияние гравийно-галечниковых включений на стойкость резцов. Рассмотрены различные виды взаимодействия резца с гравийно-галечниковыми включениями. Показано, как частота взаимодействия резца с включениями связана с размером этих включений. Приведены результаты экспериментальных исследований по определению давления на площадке износа и коэффициента сопротивления перемещению площадки износа резцов в зависимости от наличия гравийно-галечниковых включений в грунте. Дана оценка схожести полученных зависимостей с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** Траншеекопатель, мерзлый грунт, гравийно-галечниковые включения, процесс резания, взаимодействие резца с включениями, площадка износа резца.

**Дата принятия к публикации:** 04.10.2019  
**Дата публикации:** 25.12.2019

**Сведения об авторах:**

**Кравченко Сергей Михайлович** – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные и дорожные машины» ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», e-mail: [kravchenkosm.1951@mail.ru](mailto:kravchenkosm.1951@mail.ru)

**Слепченко Владимир Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», e-mail: [vldslp@mail.ru](mailto:vldslp@mail.ru).

**Abstract.** Inhomogeneous frozen and strong soils significantly reduce the life cycle of the cutting tool of trenchers due to an increase in the average maximum soil resistance during cutting and an increase in contact pressure at the wear site. The paper presents an approach to determining the resistances at the site of wear of the cutters, which allows taking into account the effect of gravel-pebble inclusions on the strength of the cutting tool with the necessary accuracy. Various types of interaction of the cutter with gravel-pebble inclusions are considered. It is shown how the frequency of interaction of the cutter with inclusions is related to the size of these inclusions. The results of experimental studies to determine the pressure at the wear site and the coefficient of resistance to movement of the wear site of the cutters depending on the presence of gravel and pebble inclusions in the soil are presented. An estimate of the convergence of the obtained dependences with experimental data is presented.

**Keywords:** Trencher, frozen soil, gravel and pebble inclusions, cutting process, the interaction of the cutter with the inclusions, wear area of the cutter.

**Date of acceptance for publication:** 04.10.2019  
**Date of publication:** 25.12.2019

**Authors' information:**

**Sergei M. Kravchenko** – PhD, Associate Professor, Department «Building and road machines» at Tomsk State University of Architecture and Building, e-mail: [kravchenkosm.1951@mail.ru](mailto:kravchenkosm.1951@mail.ru)

**Vladimir A. Slepchenko** – PhD, Associate Professor, Department «Building and road machines» at Tomsk State University of Architecture and Building, e-mail: [vldslp@mail.ru](mailto:vldslp@mail.ru)

## 1. Введение

Потребность в машинах для разрушения прочных и мерзлых грунтов находится на достаточно высоком уровне вследствие климатических особенностей нашей страны и необходимости вести строительные и восстановительные работы круглогодично. Спектр применения данного вида техники расширяется при возникновении чрезвычайных ситуаций в зимнее время.

Особенно неблагоприятными условиями применения данных машин является разработка мерзлых и прочных грунтов с гравийно-галечниковыми включениями, так как их разработка сопровождается повышенной динамикой процесса резания. Кроме роста среднемаксимальных усилий сопротивления резанию грунта возникают точечные контактные нагрузки на переднюю и заднюю грани режущего инструмента. Это ведет к интенсификации износа как микрорезанием, так и созданием значительных ударных нагрузок в паяном шве между армирующей пластиной и державкой резца, что ведет к преждевременному выходу резца из строя. Поэтому обеспечение стойкости режущего инструмента траншейных экскаваторов в данных условиях является насущной задачей.

## 2. Постановка задачи

Одним из способов повышения стойкости режущего инструмента является совершенствование расчетных методик и справочных материалов, позволяющих с необходимым приближением достичь значений экспериментальных результатов.

Поэтому задачей исследования является разработка достаточных для практических расчетов рекомендаций по определению касательных и нормальных усилий, давления на площадке износа задней грани резца и коэффициента сопротивления перемещению резца при разрушении мерзлого и прочного грунта с гравийно-галечными включениями.

## 3. Основные положения и результаты исследования

При резании мерзлых однородных грунтов резы траншеекопателей интенсивно изнашиваются [1], что приводит к образованию поверхностей износа на рабочих гранях и дополнительных сопротивлений разрушению. В общем случае для резцов с различной степенью износа касательная  $P_z$  и нормальная  $P_y$  составляющие силы резания грунта (рис. 1) можно определить из выражений:

$$P_z = P_{z0} + \mu \cdot g \cdot F, \quad (1)$$

$$P_y = P_{y0} + g \cdot F, \quad (2)$$

где  $P_{z0}$  и  $P_{y0}$  – соответственно касательная и нормальная составляющие силы резания острым резцом (рис. 1);  $g$  – давление грунта на поверхности износа резца;  $\mu$  – коэффициент сопротивления перемещению поверхностей износа;  $F$  – площадь поверхностей износа.

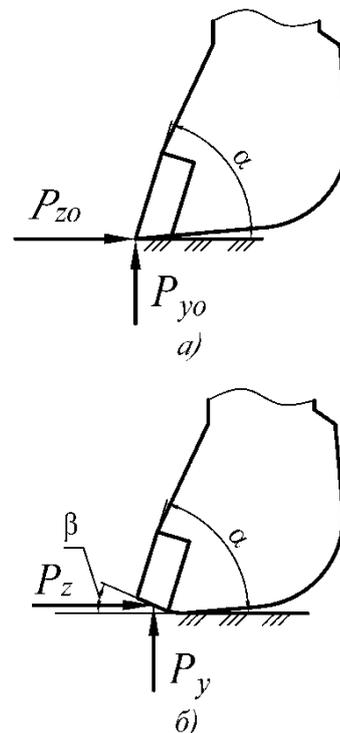


Рис. 1. Приложение нагрузок и геометрия резания для резца:  
а - острого; б - изношенного

Для определения сопротивлений резанию необходимо иметь данные о параметрах  $\mu$  и  $g$ , которые, как показано [2], зависят от фи-

зических свойств мерзлых грунтов и для различных видов однородных грунтов могут быть найдены по данным [2].

Наличие гравийно-галечниковых включений в мерзлых грунтах приводит к изменению основной характеристики процесса резания – среднемаксимального усилия резания [3, 4].

Для грунтов с гравийно-галечниковыми включениями эти параметры до сих пор были недостаточно изучены и поэтому потребовалось провести ряд экспериментальных исследований процесса их резания. Производились замеры касательной и нормальной составляющих сопротивления резанию образцов мерзлых грунтов различного состава с включениями обломков прочных горных пород, размеры, содержание и минеральный состав которых соответствовали бы наиболее вероятным естественным грунтам, залегающих в верхних слоях четвертичных отложений земной коры. Применялись стандартные резцы типа И-90, армированные металлокерамическим твердым сплавом ВК8-В.

Давление  $g$ , действующее на поверхность износа, находилось по формуле

$$g = \frac{P_y - P_z}{F}. \quad (3)$$

Коэффициент сопротивления  $\mu$  перемещению поверхностей износа рассчитывался из выражения

$$\mu = \frac{P_z - P_{zo}}{P_y - P_{yo}}. \quad (4)$$

При резании образцов мерзлого грунта с гравийно-галечниковыми включениями нормальная составляющая усилия резания, а также давление определяются характером взаимодействия резца с разрушаемой средой. При резании однородной фазы грунтов давление, действующее на поверхности износа резца, определяется гранулометрическим составом, температурой, влажностью и плотностью грунта и в зависимости от данных факторов может быть найдено по методике [5]. При взаимодействии резца с твердыми включениями усилие  $P_y$  изменяется в соответствии с характером контакта с ними поверхности износа.

При хрупком разрушении включений (раскалывании) появляются кратковременно действующие пиковые нагрузки  $P_{yв1}$  (рис. 2), действующие на участке  $l_{pi}$ . При перерезании включения или вдавливании его в грунт площадкой износа задней грани возникают пиковые усилия  $P_{yв2}$ , действующие на определенном участке  $l_i$ , длина которого зависит от размера включения (рис. 2).

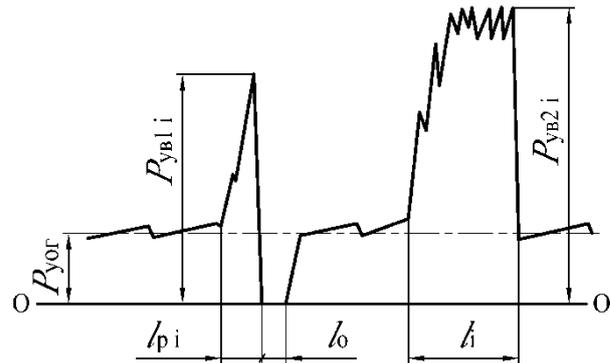


Рис. 2. Динамограмма составляющей  $P_y$

Описанный характер изменения вертикальной составляющей силы сопротивления резанию  $P_{yв}$  дает основание рассматривать возникающее при этом давление как средневзвешенный показатель и определять его, исходя из правила аддитивности, по выражению

$$\bar{g} = \frac{g_o \cdot L_o + g_b \cdot L_b}{L}, \quad (5)$$

где  $g_o$  – среднее давление на площадку износа при резании однородного грунта;  $g_b$  – среднее давление на площадку износа, возникающее при контакте резца с включениями;  $L$  – общая длина контакта резца с разрушаемой средой;  $L_o$  – путь резания по однородному грунту;  $L_b$  – путь резания в контакте с включениями.

Поскольку  $L_o = L - L_b$ , тогда выражение (5) можно записать в следующем виде

$$\bar{g} = g_o + \frac{L_b}{L}(g_b - g_o). \quad (6)$$

Анализ следов среза на образцах мерзлых грунтов с твердыми включениями показал, что при кратковременном действии усилия  $P_{yв1}$ , когда динамограмма имеет вид треугольника, длина основания которого  $l_{pi}$  намного меньше среднего размера включений

(рис. 2), происходит в основном их хрупкое разрушение. При этом, очевидно, только часть площадки износа контактирует с включением до того, как произойдет его хрупкое разрушение.

При перерезании включений возникают пиковые усилия  $P_{yb2}$ , у которых длина участка контакта  $l_i$  (рис. 2) соизмерима с размерами включений и, как показал анализ осциллограмм, её можно приближенно принять равной  $\bar{d}_b$ .

На основании вышеуказанного можно записать

$$L_b = L_{\pi} + L_p, \quad (7)$$

где длины участков перерезания  $L_{\pi}$  и раскалывания  $L_p$ , в свою очередь, определяются из выражений:

$$L_{\pi} = \sum_{i=1}^{n_{\text{пер}}} l_i = \bar{l}_{\pi} \cdot n_{\text{пер}}, \quad (8)$$

$$L_p = \sum_{i=1}^{n_p} l_{pi} = \bar{l}_p \cdot n_p. \quad (9)$$

Число случаев перерезания или вдавливания включений, приводящих к появлению усилий  $P_{yb2}$ , можно выразить в зависимости от общего количества контактов с включениями:

$$n_{\text{пер}} = n_b \cdot K_{\text{пу}}, \quad (10)$$

где  $K_{\text{пу}}$  – коэффициент, выражающий относительное количество случаев перерезания или вдавливания включений от общего числа контактов с ними.

Коэффициент  $K_{\text{пу}}$  зависит от параметров резания и гранулометрического состава крупнообломочных грунтов. При толщинах резания, характерных для работы траншекопателей, данный коэффициент в зависимости от средних размеров включений можно определить по графической зависимости, построенной на основании статистического анализа осциллограмм (рис. 3).

Длина пути контакта площадки износа по задней грани с хрупко разрушаемыми включениями, как показала статическая обработка осциллограмм, в основном зависит от размера включений и приближенно может быть найдена из выражения

$$\bar{l}_p = 0,1 \cdot \bar{d}_b. \quad (11)$$

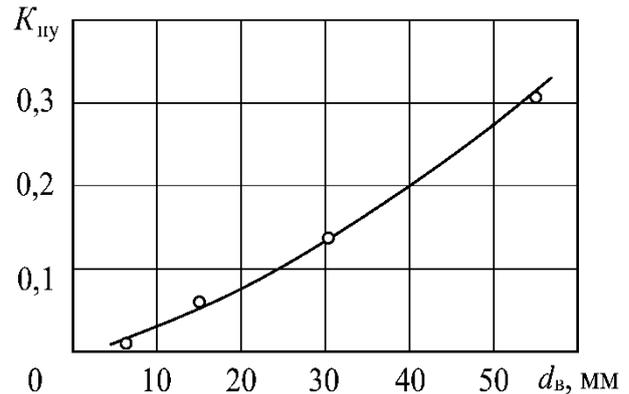


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $K_{\text{пу}}$  от среднего размера включений

Нормальные составляющие сопротивлений резанию при контакте резцов рабочего органа траншекопателя с гравийно-галечниковыми включениями можно вычислить по формулам:

$$P_{yb1} = g_b \cdot F_b, \quad (12)$$

$$P_{yb2} = g_b \cdot F, \quad (13)$$

где  $F_b$  – площадь поверхности износа задней грани, контактирующей с гравийно-галечниковым включением в момент его хрупкого разрушения.

Среднее давление  $g_b$  с необходимой достоверностью можно определить по формуле

$$g_b = 0,65 \cdot g_{b \max}, \quad (14)$$

где  $g_{b \max}$  – среднее максимальное давление, возникающее при перерезании включений.

На основании уравнений (7) – (11) общая длина пути площадки износа задней грани в контакте с включениями определяется по формуле

$$L_b = \bar{d}_b \cdot \frac{L}{t_b} \cdot (0,1 + 0,9k_{\text{пу}}). \quad (15)$$

где  $t_b$  – среднее расстояние между включениями.

Среднее давление, действующее на площадку износа, при резании мерзлого грунта с включениями, можно вычислять по следующему уравнению, полученному после подстановки (15) в (6):

$$\bar{g} = g_o + \frac{\bar{d}_b}{t_b} \cdot (0,9k_{\text{пу}} + 0,1) \cdot (g_b - g_o). \quad (16)$$

Давление  $g_b$  зависит от физико-механических свойств материала включений и от ряда других факторов, связанных с характером

ристиками мерзлого грунта. Экспериментально установлено, что среднее значение  $g_{b \max}$  для типичных по свойствам гравийно-галечниковых включений составляет 250 МПа. В связи с этим, среднее давление  $g_b$ , вычисленное по зависимости (14), равно 162 МПа.

С помощью формулы (16) можно определить среднее давление при резании мерзлых грунтов с включениями определенных размеров, т.е. одной фракции. При наличии в грунте различных по размеру включений уравнение (16) преобразуется к виду

$$\bar{g} = g_o + (g_b + g_o) \cdot \sum_{i=1}^N \frac{\bar{d}_{bi}}{t_{bi}} \cdot (0,9k_{\text{пы}i} + 0,1), \quad (17)$$

где  $\bar{d}_{bi}$  – средний размер включений  $i$ -й фракции;  $t_{bi}$  – среднее расстояние между включениями  $i$ -й фракции;  $k_{\text{пы}i}$  – коэффициент  $i$ -й фракции.

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных значений среднего давления  $\bar{g}$  при резании мерзлых грунтов с крупнообломочными включениями обладают хорошей сходимостью, так как отклонение расчетных значений не превышает 16 % от экспериментальных данных. Это позволяет сделать заключение о возможности практического использования предложенной методики по определению давления  $\bar{g}$ .

Коэффициент  $\mu$  характеризует сопротивление перемещению площадки износа задней грани. Он зависит от угла  $\beta$  между профилем площадки износа и траекторией движения резца (рис. 1), угла трения материала резца о грунт  $\varphi$  и определяется по формуле

$$\mu = \text{tg}(\beta + \varphi). \quad (18)$$

Углы  $\beta$  и  $\varphi$  зависят в основном от свойств мерзлого грунта и материала резца [5].

Исследования показали, что профиль изношенной поверхности задней грани при резании грунтов с включениями в определенной степени отличается от профиля, формирующегося при резании однородного грунта. Отличие в основном заключается в радиусе закругления при вершине резца, который при резании крупнообломочных грунтов

больше, чем при резании грунтов, не содержащих частиц больше 2 мм. Радиус закругления зависит от размера включений в грунтах и возрастает с увеличением  $d_b$ .

Данное обстоятельство приводит к определенному увеличению коэффициента сопротивления  $\mu$ . В то же время, экспериментально установлено, что на значение коэффициента  $\mu$  существенное влияние оказывает боковая составляющая силы сопротивления резанию  $P_x$ , приводящая к значительному увеличению сил трения на резце. Касательная составляющая  $P_z$  является суммой касательных сопротивлений, действующих на все рабочие поверхности инструмента, взаимодействующие с разрушаемой средой. Поэтому коэффициент сопротивления  $\mu$  отражает действие касательных сопротивлений перемещению не только на площадке износа задней грани, но и на поверхностях износа боковых граней. При возникновении значительных усилий  $P_x$  в случае контакта боковых граней резца с включениями коэффициент  $\mu$  увеличивается. Степень увеличения зависит от размера включений и их содержания в грунтах.

При перерезании крупных включений в центральной их части усилия на боковых гранях незначительны, так как боковой развал начинается практически от дна прорези вследствие хрупкого характера разрушения породы. Экспериментальным путем определено, что в этом случае коэффициент сопротивления  $\mu \approx 0,4$ .

В процессе резания крупнообломочных грунтов коэффициент  $\mu$  не остается постоянным вследствие изменения характера взаимодействия резца с отдельными фазами грунта. При движении в контакте с однородной фазой коэффициент  $\mu$  практически не отличается от значений, характерных для данного вида грунта [2]. При контакте резца с включениями боковыми гранями коэффициент  $\mu$  существенно увеличивается за счет трения по боковым граням.

Среднее значение  $\mu$  может быть определено по принципу аддитивности, использованному при анализе влияния включений на

среднее давление на площадке износа задней грани.

Однако сложность определения относительного влияния составляющей  $P_x$  на сопротивление движению не дает возможность произвести расчет коэффициента  $\mu$  по указанной методике.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют дать рекомендации для ориентировочного расчета коэффициента сопротивления  $\mu$ , необходимого для оценки трудности разработки грунтов с включениями.

Если  $d_b \geq 10$  мм, то коэффициент сопротивления для грунтов с включениями можно определить по формуле

$$\mu_{и} = \mu \cdot (1 + 0,01\bar{d}_b) \cdot (1 + k_{\mu,m}), \quad (19)$$

где  $\mu$  – коэффициент сопротивления движению площадки износа при резании однородного грунта;  $k_{\mu,m}$  – коэффициент, учитывающий влияние содержания включений.

Коэффициент  $k_{\mu,m}$  может быть найден по графику (рис. 4).

При  $d_b \leq 10$  мм  $\mu_{в} \approx \mu$ .

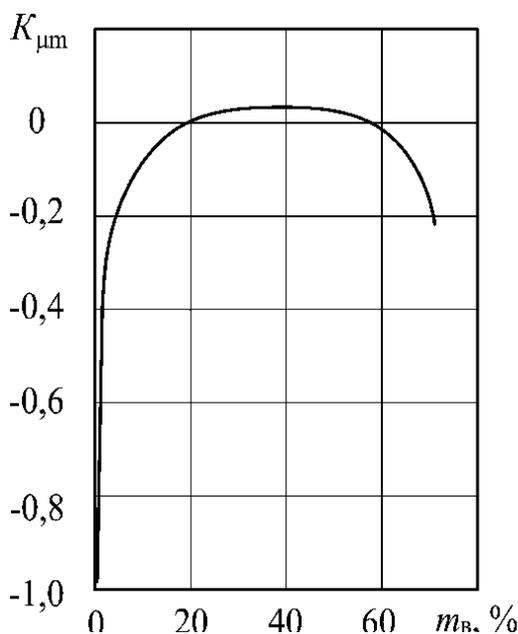


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $k_{\mu,m}$  от содержания включений ( $d_b > 10$  мм) в грунте

При резании грунтов с включениями различных размеров средневзвешенное значение коэффициента  $\mu_{в}$  находится из выражения

$$\mu_{в} = \mu \cdot \left[ 1 + \sum_{i=1}^N (k_{\mu,i} - 1) \right], \quad (20)$$

где  $k_{\mu,i} = (1 + 0,01\bar{d}_{bi}) \cdot (1 + k_{\mu,mi})$  – коэффициент для  $i$ -й фракции.

Полученные результаты коэффициента  $\mu_{в}$  по формуле (20) для исследованных грунтов отличаются в среднем на 15% от экспериментальных данных. Данное обстоятельство дает возможность говорить о практическом использовании предлагаемого способа нахождения коэффициента сопротивления  $\mu_{в}$ .

#### 4. Заключение

В итоге проведения представленных выше исследований были получены экспериментальные и аналитические зависимости по определению параметров взаимодействия режущего инструмента траншекопателей с мерзлыми грунтами с гравийно-галечными включениями с учетом частоты и длительности контакта с этими включениями, а также износа инструмента. В статье:

1) представлены результаты оценки экспериментальных данных при взаимодействии резца траншекопателя с мерзлыми грунтами с гравийно-галечными включениями;

2) проведена оценка и дан способ определения количества случаев и длительности контакта резца при раскалывании, перерезании или вдавливании гравийно-галечных включений мерзлого грунта;

3) даны рекомендации по определению средневзвешенного значения давления на площадке износа резца при резании мерзлого грунта с гравийно-галечными включениями;

4) представлен способ расчета коэффициента сопротивления движению площадки износа резца в контакте с мерзлыми грунтами с гравийно-галечными включениями, имеющий достаточную сходимость для практического применения.

Результаты изысканий могут быть использованы для уточненного расчета сопротивлений резанию мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями при конструировании режущего инструмента

траншеекопателей. Дальнейшее развитие этого подхода позволит получить более энергоэффективные конструкции рабочих

органов траншейных экскаваторов с возможностью прогнозирования их срока службы.

### Список литературы

1. Кириллов Ф.Ф., Митерев Г.И., Кравченко С.М., Слепченко В.А. Учет физико-механических свойств мерзлых грунтов при проектировании землеройных машин // Строительные и дорожные машины. 2007. № 12. С. 29-31.

2. Лещинер В.Б., Кравченко С.М. Анализ свойств мерзлых грунтов, определяющих износ инструмента и вызванные им сопротивления резанию // Исследования механизации строительства и транспорта. Томск: Изд-во Томского государственного университета. 1984. С. 3-9.

3. Негодин А.В., Кравченко С.М., Осипов С.П. Влияние гравийно-галечниковых включений в мерзлых грунтах на показатели процесса их резания острым инструментом // Вестник ТГАСУ. 2014. № 1. С. 191-200.

4. Шемякин С.А., Чебан А.Ю., Ращенко И.С. Физическая картина взаимодействия зуба землеройной машины с крупнообломочным включением в мерзлой породе и определение сопротивления резанию // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2012. № 4. С. 45-52.

5. Добжинский Д.П., Лещинер В.Б. Трение инструмента о мерзлый грунт при резании // Строительные и дорожные машины. 1982. № 1. С. 24-25.

### References

1. Kirillov F.F., Miterev G.I., Kravchenko S.M., Slepchenko V.A. Taking into account the physical and mechanical properties of frozen soils in the design of earthmoving machines. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*, 2007, No. 12, pp. 29-31. (In Russian)

2. Leshchiner V.B., Kravchenko S.M. Analysis of the properties of frozen soils that determine tool wear and resistance to cutting. In: *Issledovaniya mekhanizatsii stroitelstva i transporta* [Studies of the mechanization of construction and transport]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 1984, pp. 3-9. (In Russian)

3. Negodin A.V., Kravchenko S.M., Osipov S.P. The effect of gravel-pebble inclusions in frozen soils on the indicators of the process of their cutting with a sharp tool. *Vestnik TGASU*, 2014, No. 1, pp. 191-200. (In Russian)

4. Shemyakin S.A., Cheban A.Yu., Rashchenya I.S. The physical picture of the interaction of the tooth of a digging machine with coarse clastic inclusion in frozen rock and determination of resistance to cutting. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, No. 4, pp. 45-52. (In Russian)

5. Dobzhinsky D.P., Leshchiner V.B. Friction of the tool on frozen soil during cutting. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*, 1982, No. 1, pp. 24-25. (In Russian)