

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.879.4

*ОСИПОВ СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ, канд. техн. наук, вед. научный сотрудник,
osip1809@rambler.ru*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,*

*КРАВЧЕНКО СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
sdm@tsuab.ru*

*ШКОЛЬНЫЙ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
sander1976@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ОБОБЩЁННЫЙ КРИТЕРИЙ СВОЕВРЕМЕННОСТИ ЗАМЕНЫ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ЦЕПНЫХ ТРАНШЕЕКОПАТЕЛЕЙ

Предложен обобщённый критерий своевременной замены режущих инструментов (резцов) цепных траншеекопателей. Сущность обобщенного критерия основана на сочетании временного изменения экономической эффективности траншеекопателей в процессе разработки мерзлых грунтов или горных пород с критериями наступления предельного состояния резцов. Показано существование оптимального времени замены резцов по критерию минимума стоимости погонного метра разработанной траншеи для различных видов временных зависимостей производительности траншеекопателей. Рассмотрены особенности критериев предельного состояния резцов. Даны рекомендации по комплектованию траншеекопателей информационными устройствами, что позволит избежать неоднозначности в определении момента времени для смены комплекта изношенных резцов.

Ключевые слова: цепные траншеекопатели; предельное состояние; резцы; своевременность замены; эффективность; оптимальное время.

*SERGEY P. OSIPOV, PhD, Leading Scientist,
osip1809@rambler.ru*

*National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia,*

*SERGEY M. KRAVCHENKO, PhD, A/Professor,
sdm@tsuab.ru*

*ALEKSANDR N. SHKOLNYI, PhD, A/Professor,
sander1976@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

GENERALIZED CRITERION FOR CUTTING TOOL REPLACEMENT IN CHAIN TRENCHERS

The paper presents the generalized criterion for timeliness of cutting tool replacement in chain trenchers. The generalized criterion is based on a combination of the time change of the economic efficiency of chain trenchers during the frozen soil excavation having the limit state criteria for the cutters. The optimum time is shown for the cutting tool replacement using the criterion of minimum cost per running meter of a developed trench for different types of time dependencies of trencher performance. The limit state criteria are considered for cutting tools. Recommendations are given to trencher equipment with information devices to avoid ambiguity in ascertaining the time for cutter replacement.

Keywords: ladder ditcher; limit state; cutters; timeliness of replacement; efficiency; optimum time.

Введение

Территории России и других стран являются неблагоприятными для проведения строительных и ремонтных работ [1], связанных с разработкой сложных и мерзлых грунтов. Цепные траншеекопатели широко используются для нарезания щелей с последующей разработкой траншей, котлованов в строительстве и горном деле [2, 3]. Рабочими органами цепных траншеекопателей являются бары различной конструкции со сменным режущим инструментом (резцами) [Там же]. Сложные и мерзлые грунты обладают специфическими механическими параметрами [4, 5] и высокой абразивной способностью. В результате абразивного износа резцы цепных траншеекопателей при резании сложных, мерзлых грунтов и горных пород интенсивно теряют свою режущую способность [6]. Этот фактор приводит к снижению производительности траншеекопателей и возрастанию материальных затрат на разработку грунтов. Необходимость создания критерия и реализующей его методики своевременной замены резцов связана с требованиями потребителя, главным из которых является обеспечение максимальной эффективности резания грунтов.

1. Обобщённый критерий своевременности замены резцов

Критерий своевременности замены резцов должен помочь дать однозначный ответ на вопрос о необходимости замены резцов траншеекопателей. Естественно положить в основу этого критерия экономическую эффективность использования цепных траншеекопателей.

К экономическим показателям процесса разработки грунтов цепными траншеекопателями следует отнести [7–9]: себестоимость часа работы машины без учета затрат на комплект резцов – C , руб./ч; производительность – Π , м/ч; стоимость комплекта резцов – C_p , руб.

Производительность цепного траншеекопателя Π совпадает с усредненной скоростью подачи за весь период работоспособности резцов V_{Π} . Под единицей выработки продукции применительно к цепному траншеекопателю понимается длина прорезанной щели – L , м.

К версии оценки эффективности использования траншеекопателей [8] близок подход из статьи [9]. В этом подходе эффективность использования траншеекопателей характеризуется усредненной стоимостью одного погонно-

го метра сформированной щели η . Трансформированная формула из [9] для вычисления η будет выглядеть следующим образом:

$$\eta = \frac{C(t_p + t_B) + C_p}{\Pi t_p}. \quad (1)$$

Здесь t_p – время эксплуатации одного комплекта резцов, ч; t_B – время, необходимое для замены всего комплекта резцов, ч. Отметим, что время t_p не включает в себя простои, которые не связаны с резанием грунтов и с заменой или восстановлением режущего инструмента.

Ниже будем анализировать выражение (1), просто и логично связывающее этапы работы резцов и их восстановления.

Очевидно, что стоимость часа работы траншеекопателя C можно считать постоянной величиной, если стабилизированы экономические условия, которые не зависят от предприятия собственника дорожных и строительных машин. К указанным условиям следует отнести: стоимость аренды помещений, земли; налоги; стоимость горюче-смазочных материалов.

Устоявшаяся схема взаимодействия предприятия с поставщиками запасных частей и оборудования в условиях стабильности экономических условий позволяет сделать заключение о постоянстве стоимости идентичного сменяемому комплекта резцов C_p .

В работе [9] допускается также постоянство времени, необходимого для замены всего комплекта резцов дорожной фрезы. Рабочие среды, с которыми взаимодействуют дорожные фрезы, отличаются существенно большей однородностью по параметрам разрушения (резания) от сред, характерных для цепных траншейных траншеекопателей. Поэтому более логично для исследуемой задачи рассматривать время t_B как случайную величину. Вероятностные характеристики t_B определяются в результате анализа процессов практического восстановления рабочих органов цепных траншеекопателей непосредственно на предприятии-хозяине. Отметим, что значение t_B можно считать постоянным исключительно для технологии восстановления работоспособности траншеекопателя, при которой рабочий орган (цепь с резцами) меняется целиком на новый или восстановленный.

Время эксплуатации одного комплекта резцов t_p определяется долговечностью единичного резца, т. е. временем T , по истечении которого резец достигает предельного состояния:

$$t_p \leq T. \quad (2)$$

Простота ограничения (2) является кажущейся. Это утверждение связано с различием параметров резцов траншеекопателя и случайностью взаимодействий единичных резцов с абразивными частицами грунтовой среды. Из сказанного следует, что время T является случайной величиной.

Из анализа выражения (1) следует обратная пропорциональность коэффициента эффективности η производительности траншеекопателя Π .

Резцы в процессе разрушения грунтов испытывают со стороны твердых минеральных зёрен сильное абразивное воздействие, приводящее к абразивному износу резцов. В результате абразивного износа форма режущей по-

верхности трансформируется достаточно сложным образом. В работе [8] указано, что разрабатываемая грунтовая среда оказывает сопротивление резанию и в направлении, противоположном направлению резания, и в перпендикулярном направлении. Поэтому принято разделять всю поверхность износа на две части. Первая часть поверхности формируется за счёт взаимодействия резца с грунтовой средой, обусловленного его внедрением в грунтовую среду в направлении, перпендикулярном направлению резания. Вторая часть поверхности износа формируется срезаемым грунтом.

Увеличение площади поверхности износа приводит к снижению мгновенной скорости внедрения резцов в разрабатываемую среду и к снижению мгновенной скорости резания, в результате чего снижается и мгновенная производительность траншекопателя $\Pi(t_p)$. Для понимания и возможности использования в дальнейшем проведём трансформацию выражения (1) к виду

$$\eta(t_p) = \frac{C(t_p + t_B) + C_P}{\int_0^{t_p} \Pi(t_p) dt_p}. \quad (3)$$

Интеграл в формуле (3) равен длине прорезанной за время t_p щели L . В отличие от (3) в работе [8] приводятся зависимости производительности не от t_p , а от длины прорезанной траншеи. Из (3) следует, что поведение функции $\Pi(t_p)$ в целом определяет поведение зависимости $\eta(t_p)$. Особенности же зависимости будут связаны со значениями C , C_P и t_B . Временная зависимость производительности траншекопателя может быть оценена экспериментально. Точная оценка зависимости $\Pi(t_p)$ требует соблюдения жёстких требований к однородности условий резания, что практически невозможно, особенно для мёрзлых грунтов с крупно- и мелкозернистыми включениями.

Целью настоящей работы является разработка критерия эффективности своевременной замены резцов. Очевидно, что начиная с некоторого момента времени t_p текущая производительность траншекопателя опустится ниже некоторого предела, после которого пользователю будет экономически невыгодно использовать траншекопатель с изношенным режущим инструментом. Найдём условия, при которых $\eta(t_p)$ имеет минимум. Необходимым условием наличия минимума у функции $\eta(t_p)$ в точке $t_{opt} < \infty$ является равенство производной в этой точке нулю. Упомянутое условие эквивалентно уравнению

$$\int_0^{t_p} \frac{\Pi(t_p)}{\Pi(0)} dt_p - \left(t_p + t_B + \frac{C_P}{C} \right) \frac{\Pi(t_p)}{\Pi(0)} = 0.$$

Проверим достаточное условие существования минимума в точке $t_{opt} < \infty$. Для этого найдём вторую производную от функции $\eta(t_p)$ и после подстановки $t_p = t_{opt}$ получим

$$\eta''(t_{opt}) = \frac{-(C(t_{opt} + t_B) + C_P)\Pi'(t_{opt})}{\left(\int_0^{t_{opt}} \Pi(t_p) dt_p \right)^2}. \quad (4)$$

Функция $\Pi(t_p)$ является убывающей, т. е. $\Pi'(t_p) < 0$, поэтому из анализа (4) следует, что $\eta'(t_{\text{opt}}) > 0$, а это и есть достаточное условие существования минимума функции $\eta(t_p)$ в точке $t_{\text{opt}} < \infty$.

Сказанное выше позволяет сформулировать обобщённый критерий своевременности замены резцов цепных траншеекопателей, который даёт рекомендации по выбору времени эксплуатации одного комплекта резцов.

Время эксплуатации одного комплекта резцов $t_{\text{э}}$ выбирается из комплексного условия, сочетающего в себе экономические показатели и критерий предельного состояния:

$$t_{\text{э}} = \min \left\{ t_{\text{opt}} : \eta(t_{\text{opt}}) = \min_{t_p} \frac{C(t_p + t_B) + C_p}{t_p}, t_{\text{lin}} = T \right\}. \quad (5)$$

$$\int_0^{t_p} \Pi(t_p) dt_p$$

В выражении (5) закреплены два возможных сценария. В первом сценарии предельное состояние резцов наступает раньше момента времени, после которого эксплуатация комплекта резцов будет экономически неэффективной. Во втором сценарии предельное состояние наступает позже.

Ниже рассмотрим особенности применения критерия (5) на практике.

2. Особенности применения обобщённого критерия

2.1. Временные зависимости производительности траншеекопателей

Для описания зависимости производительности траншеекопателя от времени $\Pi(t)$ могут быть использованы функции различного вида [8, 9]: линейные, вогнутые, выпуклые и функции с перегибом. Все указанные функции являются непрерывными, убывающими и гладкими. На рис. 1 для иллюстрации приведены основные виды функций, описывающих $\Pi(t)$. Для простоты сравнения они заданы на одинаковом временном интервале.

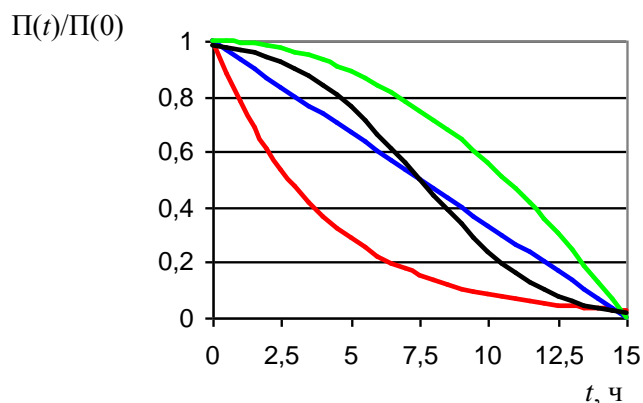


Рис. 1. Типичные виды функций для описания $\Pi(t)/\Pi(0)$:

— вогнутая; — линейная; — выпуклая; — с перегибом

Для иллюстрации поведения зависимости коэффициента эффективности η от времени эксплуатации была проведена серия расчётов. Расчёты проводились для следующих параметров: $C = 5000$ руб./ч; $C_p = 10\ 000$ руб.; $t_B = 0,5$ ч. При вычислениях использовались зависимости $\Pi(t_p)$, изображённые на рис. 1. Результаты расчётов приведены на рис. 2.

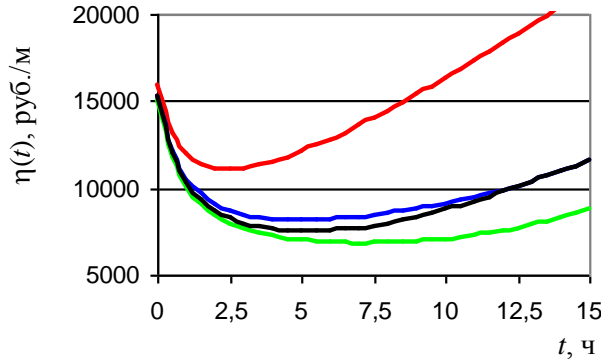


Рис. 2. Зависимость коэффициента эффективности η от времени эксплуатации:
 — вогнутая функция; — линейная функция;
 — выпуклая функция; — функция с перегибом

Анализ графических зависимостей $\eta(t_p)$ свидетельствует о наличии выраженного минимума, причём выраженность минимума тем ярнее, чем больше крутизна спада соответствующей функции $\Pi(t_p)$. Если замену комплекта резцов провести позже точки оптимума, то эффективность использования траншеекопателя может существенно уменьшиться.

Оптимальный период эффективного использования режущего инструмента определяется помимо временной зависимости $\Pi(t_p)$ не тремя параметрами C , C_p , t_B , а двумя — C_p/C и t_B .

2.2. Критерии предельного состояния режущих инструментов

Для корректного применения второго условия ($t_{lim} = T$) из выражения (5) необходимо определиться с критериями наступления предельного состояния резцов. На практике к указанным критериям выдвигается ряд требований, среди которых выделяют понятность и техническую реализуемость количественной проверки. Наиболее распространёнными критериями предельного состояния применительно к резцам траншеекопателей являются уровень предельного износа резцов и превышение тяговым усилием некоторых заданных значений. В работе [8] предложено уровень предельного износа соотносить с прочностью паяного соединения твердосплавной пластины с телом резца, заданные значения тяговых усилий связывают с буксованием базовой машины. Критерии из [8] являются понятными, но техническая реализуемость их количественной проверки на практике может оказаться сложной и привести к недоверительным заключениям о наступлении предельного состояния резцов.

Выше подчёркнуто, что сопротивление разрабатываемой среды приводит и к уменьшению скорости резания, и к уменьшению скорости внедрения

режущего инструмента в среду, что в совокупности приводит к уменьшению производительности цепного траншеекопателя.

Вне зависимости от типа применяемых резцов условие наступления предельного состояния по уровню износа Δl_{lim} эквивалентно уравнению

$$\Delta l(T) = \Delta l_{\text{lim}} . \quad (6)$$

Здесь $\Delta l(t)$ – текущее значение линейного параметра износа. Параметр $\Delta l(t)$ равен расстоянию по нормали от текущей плоскости резания до гипотетической плоскости резания, которая проходила бы через остриё исходного резца.

Для обеспечения разрушения, перемещения разрушенной породы и перемещения всего рабочего органа необходимо превышение текущим тяговым усилием траншеекопателя $F_T(t)$ некоторого предельного значения ΔF_{lim} . При несоблюдении этого требования разработка среды происходить не будет. Взаимодействие среды с рабочим органом траншеекопателя может быть достаточно условно разбито на несколько процессов. В первом из них происходит внедрение резца (резцов) в разрабатываемый массив. Второй процесс связан с отделением стружки от массива среды. В третьем процессе происходит опосредованное взаимодействие разрабатываемой среды с рабочим органом. Это процесс трения цепи по направляющей и разрушенного материала и цельной среды по поверхности рабочего органа. Разрабатываемая среда характеризуется своей прочностью σ_{lim} (на растяжение, сжатие и т. п.).

В обобщённом виде второй критерий предельного состояния описывается следующим выражением:

$$F_T(T) = \Delta F_{\text{lim}} . \quad (7)$$

С учётом внедрения резца в среду и резания уравнение (7) может быть заменено системой уравнений с соответствующими пределами и различными площадями поверхностей износа. За итоговую долговечность единичного резца логично выбрать минимальное значение из неизвестных T_1 и T_2 .

Критерий, основанный на уравнении (7) или его расширениях, не позволяет, в отличие от критерия (6), достоверно и однозначно утверждать о наступлении предельного состояния. Понижение тягового усилия, начиная с некоторого момента времени $t = T$, ниже уровня ΔF_{lim} свидетельствует лишь о том, что в данный конкретный момент в данных условиях траншеекопатель не способен выполнять свои основные рабочие функции.

Ниже рассмотрим особенности применения критериев (6) и (7) в процессе эксплуатации траншеекопателей для определения момента времени, после которого однозначно необходима замена всего комплекта резцов.

3. Определение времени замены резцов в процессе эксплуатации

Современные строительные и дорожные машины отличаются от машин предыдущих десятилетий применением информационных технологий, повышающих эффективность эксплуатации машин. Для получения исходной информации используются разнообразные датчики для оценки параметров процессов, происходящих в базовых машинах и в их рабочих органах.

Необходимо выбрать датчики, которые позволят достоверно определить момент времени, начиная с которого эксплуатация траншеекопателя с ком-

плектом изношенных резцов становится неэффективной по экономическим соображениям или по предельному состоянию резцов.

Датчики, размещённые в базовой машине и в рабочих органах траншекопателей, позволяют не только оценить интересующие потребителя параметры рабочих процессов, но и сформировать необходимые корректирующие воздействия для изменения текущих параметров базовой машины. Указанные воздействия помогут устранить возможную неоднозначность в определении момента наступления предельного состояния.

Для оценки текущего значения производительности траншекопателя минимально необходим цифровой измеритель текущей скорости подачи $V_{\Pi}(t)$. Напомним, что текущее значение производительности траншекопателя $\Pi(t)$ совпадает с $V_{\Pi}(t)$. Бортовой компьютер должен позволять вычислять текущую длину пройденной траншеи $L(t)$ и текущее ускорение $a(t)$. Оценка текущего ускорения обусловлена необходимостью корректировки скорости резания для многорезцового рабочего органа [10] с целью минимизации общей и вибрационной нагрузок на рабочий орган.

Вторым оцениваемым параметром может выступать текущая скорость резания $V_p(t)$ и (или) текущая угловая скорость ведущей звёздочки $\omega_p(t)$, связь которых описывается выражением

$$V_p(t) = \omega_p(t)(R - \Delta l(t)). \quad (8)$$

Здесь R – радиус ведущей звёздочки с учетом выступающей части резца.

Выражение (8) доказывает возможность косвенного измерения эффективного линейного параметра износа резцов $\Delta l(t)$ по текущим значениям скорости резания $V_p(t)$ и угловой скорости $\omega_p(t)$.

Оценка эффективного линейного параметра износа резцов, т. е. некоторого усреднения по всей совокупности резцов, в процессе эксплуатации является сложной задачей, что обусловлено спецификой резания грунтов и горных пород. Тем не менее, существуют датчики, которые позволяют решить указанную задачу. К таким датчикам относятся, например, контактные электромеханические измерители. При должном начальном позиционировании и калибровке эти датчики отслеживают текущее техническое состояние каждого резца, что позволяет в нестандартных ситуациях, связанных с резким изменением характеристик единичных резцов, своевременно осуществить их замену, не доводя до отказа рабочего органа в целом.

Превышение предельного уровня износа резцов является однозначным побудительным мотивом к замене резцов, директивно не допускающим дальнейшей эксплуатации рабочего органа. Несоблюдение этого требования влечёт риски серьёзных повреждений и значительных материальных затрат.

Оценка тягового усилия $F_T(t)$, необходимая для проверки (7), традиционно производится тензодатчиками. Превышение значения тягового усилия предельного значения не является однозначным свидетельством наступления предельного состояния резцов. Возможным объяснением упомянутого превышения могут быть: излишне высокие заданные уровни скорости подачи $V_{\Pi}(t)$ и скорости резания $V_p(t)$; заклинивание рабочего органа в разрабатываемой среде. Для диагностирования заклинивания измеряются уровни давлений

среды на рабочий орган с двух сторон. Если заклинивание не подтверждается, то оператор машины или бортовой компьютер пошагово снижают скорости подачи $V_{\Pi}(t)$ и резания $V_{\rho}(t)$. При положительном результате разработка среды продолжается. В противном случае возможны два варианта. В первом из них продолжается разработка траншеи в исходном направлении, но с некоторым отступом и локализацией непреодолимого препятствия. При необходимости нарезаются дополнительные щели и применяется гидравлический клин для скалывания кусков разработанной среды. Недопущению отказов рабочих органов за счёт непреодолимых препятствий способствуют тщательное исследование разрабатываемой площади и (или) применение специальной аппаратуры, например георадара, крепящегося к базовой машине со стороны, противоположной цепному рабочему органу. Всё это приводит к повышению долговечности траншеекопателя в целом и снижению сопутствующих рисков.

Затруднения резания можно отследить, измеряя сопротивление вращению ведущей звёздочки M . Помимо сопротивления среды резанию затруднение вращения звёздочки может быть обусловлено возросшей силой трения цепи по направляющей. Уменьшение влияния трения и устранение неоднозначности вывода о наступлении предельного состояния по предельному значению M_{lim} достигаются с помощью подхода, описанного выше.

Комплектование траншеекопателя необходимым набором датчиков, измерительной аппаратурой и бортовым компьютером с соответствующим программным обеспечением, несмотря на некоторое удорожание машины, приводит в конечном итоге к повышению экономической эффективности.

Заключение

Предложенный в статье обобщённый критерий своевременной замены резцов цепных траншеекопателей основан на сочетании временного изменения экономической эффективности траншеекопателей в процессе разработки с критериями наступления предельного состояния резцов. Доказано существование оптимального времени замены резцов по критерию минимума стоимости погонного метра разработанной траншеи для различных видов зависимостей производительности траншеекопателей от времени. Исследованы особенности критериев предельного состояния резцов. Сформулированы рекомендации по комплектованию траншеекопателей информационными датчиками, что позволит избежать неоднозначности в определении момента времени для смены комплекта резцов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *French, H.M.* The periglacial environment / H.M. French. – United Kingdom, Chichester : John Wiley & Sons, 2013. – 449 p.
2. *Аксенов, В.В.* Обоснование необходимости разработки баровых исполнительных органов геологов / В.В. Аксенов, В.Ю. Садовец, А.В. Дементьев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – Т. 2. – № 12. – С. 68–78.
3. *Yalcin, H.* The determination of the performance of the domestic production slant boom type endless-chain excavator (trencher) / H. Yalcin, A. B. Tekin // Tarım Makinaları Bilimi Dergisi. – 2011. – V. 7. – № 3. – P. 265–270.

4. *Ивкин, В.С.* Влияние физико-механических свойств грунта на работу машин для земляных работ / В.С. Ивкин, М.О. Алашев // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2015. – № 3. – С. 62–67.
5. *Soldatenko, A.* Methods of excavation core drilling / A. Soldatenko, H. Y. Jiang, A. Danilov // Applied Mechanics and Materials. – 2011. – V. 90. – P. 3015–3025.
6. *Hekimoglu, O.Z.* Studies on increasing the performance of chain saw machines for mechanical excavation of marbles and natural stones / O. Z. Hekimoglu // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2014. – V. 72. – P. 230–241.
7. *Дворковой, В.Я.* Эффективность и области рационального применения многофункциональных дорожно-строительных машин / В.Я. Дворковой, Д.В. Дворковой // Механизация строительства. – 2010. – № 11. – С. 5–12.
8. *Лещинер, В.Б.* Совершенствование инструмента для резания мерзлых грунтов / В.Б. Лещинер. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1991. – 212 с.
9. *Оценка экономической эффективности своевременной замены резцов дорожных фрез / С.П. Осипов, А.Н. Школьный, К.Б. Бида, А.В. Мальков // Механизация строительства. – 2014. – № 9. – С. 22–25.*
10. *Имитационно-эмпирическая модель временного распределения тягового усилия много-резцовых рабочих органов землеройных машин / С.П. Осипов, П.В. Анпилогов, С.М. Кравченко, А.В. Негодин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 1 (42). – С. 201–210.*

REFERENCES

1. *French H.M.* The periglacial environment. United Kingdom, Chichester: John Wiley & Sons, 2013. 449 p.
2. *Aksenov V.V., Sadovets V.Yu., Dement'ev A.V.* Obosnovanie neobkhodimosti razrabotki barovykh ispolnitel'nykh organov geokhodov [The rationale for the development of executive bodies of bar geokhod]. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011. V. 2. No. 12. Pp. 68–78. (rus)
3. *Yalcin H., Tekin A.B.* The determination of the performance of the domestic production slant boom type endless-chain excavator (trencher). *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*. 2011. V. 7. No. 3. Pp. 265–270.
4. *Ivkin V.S., Alashev M.O.* Vliyaniye fiziko-mekhanicheskikh svoystv grunta na rabotu mashin dlya zemlyanykh robot [Influence of physical and mechanical properties of the soil in the machines work for excavation works]. *Vestnik UIGTU*. 2015. No. 3. Pp. 62–67. (rus)
5. *Soldatenko A., Jiang H.Y., Danilov A.* Methods of excavation core drilling. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. V. 90. Pp. 3015–3025.
6. *Hekimoglu O.Z.* Studies on increasing the performance of chain saw machines for mechanical excavation of marbles and natural stones. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. V. 72. Pp. 230–241.
7. *Dvorkovoi V.Ya., Dvorkovoi D.V.* Effektivnost' i oblasti ratsional'nogo primeneniya mnogofunktsional'nykh dorozhno-stroitel'nykh mashin [Efficiency and rational use of multifunctional road-building machines]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2010. No. 11. Pp. 5–12. (rus)
8. *Leshchiner V.B.* Sovershenstvovanie instrumenta dlya rezaniya merzlykh gruntov [Tool improvement for permafrost cutting]. Tomsk: TSU Publ., 1991. 212 p.(rus)
9. *Osipov S.P., Shkol'nyi A.N., Bida K.B., Mal'kov A.V.* Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti svoevremennoi zameny reztsov dorozhnykh frez [Economical efficiency of timeliness of rotary hoe cutter replacement]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2014. No. 9. Pp. 22–25. (rus)
10. *Osipov S.P., Anpilov P.V., Kravchenko S.M., Negodin A.V.* Imitatsionno-empiricheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo usiliya mnogoreztsovykh rabochikh organov zemleroynykh mashin [Empirical model simulated for moving force time distribution of multicut operating elements]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 1. Pp. 201–210. (rus)