

УДК 625.089.21

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-196-207>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗАНИЮ ПРИ РАЗРУШЕНИИ АСФАЛЬТОБЕТОНА ЕДИНИЧНЫМ РЕЖУЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Д.В. Фурманов, В.С. Чижов, Н.Э. Лысаков
ФГБОУ ВО «ЯГТУ»,
г. Ярославль, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена результатам исследования сопротивляемости резанию дорожных асфальтобетонных покрытий в процессе удаления изношенных покрытий рабочими органами фрезерных машин. Актуальность работы обусловлена появлением новых марок асфальтобетонных смесей в совокупности с использованием новых типов режущих элементов, для которых затруднительно прогнозировать нагрузки на рабочий орган при решении задач проектирования новых и обосновании режимов работы существующих машин.

Цель. Решается задача исследования взаимодействия единичного режущего элемента дорожной фрезы с материалом при максимальном соответствии скоростных и геометрических показателей процесса резания с реальными машинами.

Материалы и методы. Экспериментальные работы производились путем определения касательной составляющей силы сопротивления резанию, а также работы этой силы на маятниковом стенде с применением регистрирующей аппаратуры. Производилось разрушение четырех различных марок асфальтобетона. Для каждой марки материала проведен двухфакторный эксперимент. Производилась оценка касательных составляющих сил сопротивления резанию в зависимости от толщины срезаемой стружки и температуры материала.

Результаты. В результате проведения эксперимента получены данные, позволяющие обоснованно определять нагрузки на зубьях дорожных фрез, определять энергоемкость процесса и мощность привода рабочего органа. Установлено, что рост касательной составляющей силы сопротивления резанию происходит достаточно интенсивно, с увеличением толщины срезаемой стружки, только на начальных стадиях заглубления резца. При увеличении толщины срезаемой стружки рост касательной составляющей силы сопротивления резанию происходит не столь интенсивно. Во всех случаях на значение силы сопротивления резанию оказывает влияние температура материала, однако это влияние менее значительно для асфальтобетонных смесей, имеющих более высокое содержание щебня.

Обсуждение и заключение. Полученные данные позволяют не только определять касательные силы сопротивления резанию на режущих элементах рабочего органа фрезерной машины, но и находить рациональные способы размещения режущих элементов на рабочем органе, а также определять рациональные режимы работы существующих и новых машин. Это возможно при использовании полученных результатов в математической модели, описывающей процесс работы фрезерного рабочего органа в целом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асфальтобетон, барабан фрезерный, сила сопротивления резанию, стенд маятникового типа, толщина срезаемой стружки, энергоемкость процесса резания.

Поступила 17.03.2020, принята к публикации 24.04.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Фурманов Д.В., Чижов В.С., Лысаков Н.Э. Экспериментальное определение сил сопротивления резанию при разрушении асфальтобетона единичным режущим элементом. Вестник СибАДИ. 2020;17 (2): 196-207. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-196-207>

© Фурманов Д.В., Чижов В.С., Лысаков Н.Э.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-196-207>

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CUTTING RESISTANCE STRENGTH AT ASPHALT CONCRETE DESTRUCTION WITH A SINGLE CUTTING ELEMENT

Denis V. Furmanov, Vladimir S. Chizhov, Nikita E. Lysakov
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Yaroslavl State Technical University”,
Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to the research results on cutting resistance of a road asphalt concrete in the process of the removal of worn coatings by the working elements of milling machines. The relevance of the work is due to the occurring of new brands of asphalt concrete alongside with the use of new types of cutting elements, for which it is difficult to predict the load on the working element when solving the problems of designing new ones and substantiation the operating conditions of the current machines.

The purpose. The objective of the study of the interaction of a single cutting element of a road mill with a material at the best fit of speed and geometric parameters of a cutting process with real machines is solved.

Materials and methods. The experimental work was carried out by determining the tangential component of a cutting resistance strength, as well as the work of this strength on a pendulum desk using a unit recording equipment. Four different types of asphalt concrete were being destroyed. A two-factor experiment was conducted for each type of the material. The tangential components of a cutting resistance strength depending on the thickness of the cut chips and the temperature of the material were evaluated.

Results. As a result of the experiment, the data were obtained that make it possible to reasonably determine the loads on the teeth of road milling machines, to determine a power capacity of the process and the drive power of the working element. It was found that the growth of the tangential component to a cutting resistance strength occurs quite intensively alongside with an increase in the thickness of the cut chips, only at the initial stages of the penetration of the cutter. With an increase in the thickness of the cut chips, the growth of the tangential component to a cutting resistance strength does not occur so intensively. In all cases the temperature of the material has an impact on the value of a cutting resistance strength, but this effect is less significant for asphalt concrete with a higher crushed stone content.

Discussion and conclusion. The obtained data make it possible not only to determine the tangential strength to cutting resistance on the cutting elements of the working element of the milling machine, but also to find rational ways to place the cutting elements on the working element, as well as to determine the rational operation conditions of the current and new machines. This is possible when using the results in a mathematical model that describes the operation of the milling working element as a whole.

KEYWORDS: asphalt concrete, milling drum, cutting resistance strength, desk type pendulum, cut chips thickness, energy intensity of a cutting process.

Submitted 17.02.20120, revised 24.04.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Furmanov D.V., Chizhov V.S., Lysakov N.E. Experimental determination of cutting resistance strength at asphalt concrete destruction with a single cutting element. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (2): 196-207. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-196-207>

© Furmanov D.V., Chizhov V.S., Lysakov N.E.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Машины с фрезерными рабочими органами прочно вошли в практику строительства и ремонта асфальтобетонного полотна автомобильных работ в основном для удаления изношенных асфальтобетонных покрытий. Главным рабочим органом этих машин является фрезерный барабан, для работы которого используется почти вся энергия двигателя. Фрезерование асфальтобетона сопровождается наличием сил сопротивления резанию на резцах фрезерного барабана. Численные значения этих сил зависят от толщины и формы срезаемой стружки, температуры материала и типа асфальтобетона.

Задачи создания новых машин и повышение эффективности существующих требуют решения численного моделирования процесса фрезерования с использованием обоснованной математической модели. При этом необходимо получать результат приемлемой точности. К сожалению, методик обоснования параметров фрез требуемого качества в открытых источниках не найдено.

Моделирование процесса фрезерования основано на определении касательных и радиальных составляющих сил сопротивления резанию на каждом резце в течение цикла резания, и в последующем векторным суммированием этих сил по рабочей площади барабана для определения суммарных сил и крутящего момента. Если вторая часть задачи решается геометрическим моделированием, результаты которого хорошо отражены, например в работах [1, 2], то ход получения численных значений составляющих сил сопротивления резания далеко не так очевиден.

Отправной точкой для формирования подходов к решению задачи может послужить богатый опыт, накопленный за последнее время в области резания и фрезерования прочных грунтов дорожно-строительных материалов. Так, в работе [1] автор экспериментально определяет силы сопротивления резанию мерзлых и талых грунтов, возникающих на единичном резце фрезерного рабочего органа. Измерялся крутящий момент, соответствующий сопротивлению при резании материала. Установлено,

что для уменьшения энергоемкости необходимо использовать фрезерный барабан с узкими резцами по краям и более широкими резцами в середине. Увеличение диаметра ротора приводит к улучшению геометрии входа резца в забой и уменьшению требуемой скорости вращения ротора. В.Ф. Кулепов с коллегами определяет методику расчета рабочего органа ледорезной машины путем экспериментального исследования нагрузок на зубьях фрезы¹. Полученные зависимости указывают на снижение энергоемкости процесса фрезерования при шахматном расположении зубьев на рабочем органе, а также при чередовании резцов с узким и широким профилем.

Значимыми факторами при определении нагрузок на рабочем органе являются прочностные и деформативные свойства обрабатываемого материала. В работе [3] экспериментальным путем определяется угол скола горной породы при резании его единичным резцом в зависимости от толщины стружки. При увеличении усилия на режущем элементе происходит скол материала образца, который связан с превышением значения силы резания над значением внутренних сил сопротивления материала сдвигу. Установлено, что чем больше толщина срезаемой стружки, тем больше угол скола, а при превышении определенного значения толщины интенсивность изменения угла уменьшается. Очевидно, что при увеличении угла скола снижается энергоемкость процесса фрезерования. Результаты работы могут быть использованы для оптимизации размещения режущих элементов на роторе, а также правильном выборе значений частоты вращения и подачи фрезерного барабана.

Наибольшей ценностью с точки зрения практического использования обладают результаты экспериментальных исследований [4, 5, 6, 7, 8]. В работе В.Ф. Кулепова представлены результаты исследований по резанию различных образцов асфальтобетона единичными резцами². Полученные данные показывают, что процесс резания существенно зависит от формы режущего элемента. М.П. Бараташвили [9] приводит конкретные значения удельных нагрузок на режущий элемент.

¹ Кулепов В.Ф., Малыгин А.Л., Романов В.В. Определение нагрузок на дискофрезерный рабочий орган ледорезной машины // Транспортно-технологические машины. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Сборник статей. Н. Новгород, НГТУ, 2004. С.79–82.

² Кулепов В.Ф. Исследование процесса резания асфальтобетонных покрытий дискофрезерными машинами // Российская государственная библиотека. Научный электронный архив. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004028111> (дата обращения: 27.12.2019).

К сожалению, применяемые формы режущих элементов с твердосплавными пластинами, которые использовались при экспериментальных исследованиях В. Ф. Кулепова и М.П. Бараташвили на сегодняшний день не используются. Однако эти и другие работы обладают большой практической ценностью.

Одним из недостатков указанных экспериментов является неполное соответствие параметров рабочего процесса фрезерования стендовыми рабочими органами и реальных машин. Использование для задач резания образцов материала фрезерных или строгальных станков не позволяет достичь требуемой скорости резания. Такой недостаток отсутствует при использовании маятникового стенда, успешно применяемого для определения параметров рабочего процесса фрезерования торфяной залежки Л. Н. Самсоновым³. Применительно к асфальтовым бетонам маятниковый стенд был успешно использован⁴ для определения работы сил сопротивления резанию единичным резцом.

Аналитическое определение сил сопротивления резанию грунтов и прочных дорожно-строительных материалов отражены в работах [10, 11]. Авторы указывают на хорошую достоверность результатов. Анализ и изучение факторов, влияющих на процессы резания, представлены в исследованиях⁵ [12, 13, 14]. В работе [15] оценивается влияние скорости фрезерования на эффективность работы машины. В Сианьском университете Цзяотон [16] на основе экспериментальных данных построена модель процесса фрезерования асфальтобетона. Полученные результаты предлагаются использовать для создания новых машин.

Новым направлением в области фрезерования асфальтобетона является поиск путей снижения количества дробленых зерен наполнителя в фрезерованном асфальтобетоне для задач его последующего использования. В работе [17] указывается на то, что при снижении скорости резания до 0,5 м/с и увеличении угла атаки резца до 45 градусов существенно сокращается количество разрушенных зерен наполнителя.

Несоответствие результатов геометрического моделирования работы фрезы с колебательным изменением суммарной толщины срезаемой стружки от значений мгновенной нагрузки на фрезерной машине, оснащенное гидроприводом показано в работе [18]. Это косвенно подтверждает нелинейный характер изменения сил резания с увеличением толщины срезаемой стружки. Энергоэффективность фрезерной машины исследуется путем постановки полевого эксперимента в работе [19]. На основе полученных результатов предлагается использовать модель, позволяющую подстраивать параметры привода под используемые режимы работы фрезерного агрегата. Указывается на существенное увеличение коэффициента использования мощности привода и увеличение коэффициента полезного действия.

Успешные попытки исследования процессов разрушения фрезерными машинами каменных материалов отражены в работах [20, 21, 22, 23]. Показана конечно-элементная математическая модель взаимодействия резца фрезерной машины с образцом. Указывается на высокую сходимость результатов расчета с экспериментальными данными.

Большая группа работ посвящена стойкости фрезерного инструмента [24, 25, 26]. Применительно к асфальтовым бетонам можно отнести исследование [27], посвященное влиянию свойств материала и режимов работы машины на скорость изнашивания резца.

В процессе фрезерования резец срезает стружку сложной формы. На форму стружки влияют соседние борозды, глубина которых не только различна, она еще меняется по траектории хода резца. В такой ситуации вообще сложно определить, что считать толщиной срезаемой стружки. Для каменных материалов данное исследование проводилось в работе [28] на экспериментальной установке. Для асфальтобетонов вопрос остается открытым.

Асфальтобетон представлен сотнями различных марок по всему миру. Требования к асфальтобетонам постоянно совершенству-

³ Самсонов Л. Н. Фрезерование торфяной залежи. М.: Недра, 1985, 211 с.

⁴ Фурманов Д.В., Чижов В.С. Математическое моделирование процесса фрезерования асфальтобетона // Семьдесят вторая Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 24 апреля 2019 г., Ярославль: сб. материалов конф. В 3 ч. Ч.1. С. 634– 639.

⁵ Машенский А.А., Машенский Ю.А., Синкевич П.Н. Обоснование кинетических параметров почвообрабатывающих фрез // Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития: доклады Международной научно-технической конференции, посвящ. 80-летию со дня рождения д-ра техн. наук, проф. Скотникова В. А., Минск. БГАТУ. 2009. С. 466– 473.

ются. Состав асфальтобетона может отличаться достаточно сильно даже в пределах одной марки. Сопротивляемость резанию существенно зависит от температуры. Все это делает материал трудным для изучения и постановки экспериментов. Поэтому в области исследования рабочих процессов фрезерных машин остается достаточно много «белых пятен», создающих трудности на различных этапах исследований. Однако применительно к существующим машинам и наиболее используемым дорожным покрытиям можно и нужно определять параметры рабочего процесса для создания новых, более эффективных машин и улучшения режимов работы существующих.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретический расчет составляющих сил сопротивления резанию требует обоснования модели рабочего процесса и уточнения каждого параметра, влияющего на работу модели. Поскольку модель не может полностью отражать объект, на этапе моделирования неизбежна потеря точности. Параметры модели (такие как вязкость, упругие свойства, приведенная масса, коэффициент сцепления, угол внутреннего трения и т. д.) также определяются с определенной точностью, а в ряде случаев вообще не существует методик их определения. Все это накладывает ограничения на точность и целесообразность использования аналитических моделей для расчета сил сопротивления резанию. Это обстоятельство

требует развития экспериментальных методов определения работы силы сопротивления резанию, которые бы обладали достаточной точностью и невысокой стоимостью.

Для проведения эксперимента разработан стенд маятникового типа, позволяющий моделировать резание асфальтобетона и других материалов единичным резцом фрезерного рабочего органа. Стенд состоит из маятника и регистрирующей аппаратуры (рисунок 1). Маятник представляет собой металлоконструкцию, основными элементами которой являются стойки 1, жестко установленные на фундаменте при помощи дополнительных растяжек 2. На стойках в подшипниках качения установлен маятниковый рычаг 3 и лимб 4 со стрелками, при помощи которого возможно отслеживать угол отклонения маятникового рычага (рисунок 1, а).

Маятниковый рычаг (рисунок 2) состоит из стойки 1, к которой присоединен механизм изменения вылета 3 дополнительной стойки 2. Режущий элемент 5 устанавливается на площадку 4, шарнирно закрепленную на стойке 2. Для отклонения маятника на необходимый угол установлены проушины 6. При необходимости увеличения энергии, расходуемой на процесс резания образца, существует возможность установки дополнительных инерционных элементов 7. Для передачи касательной составляющей силы сопротивления резанию на датчик 9 установлена система рычагов 8.

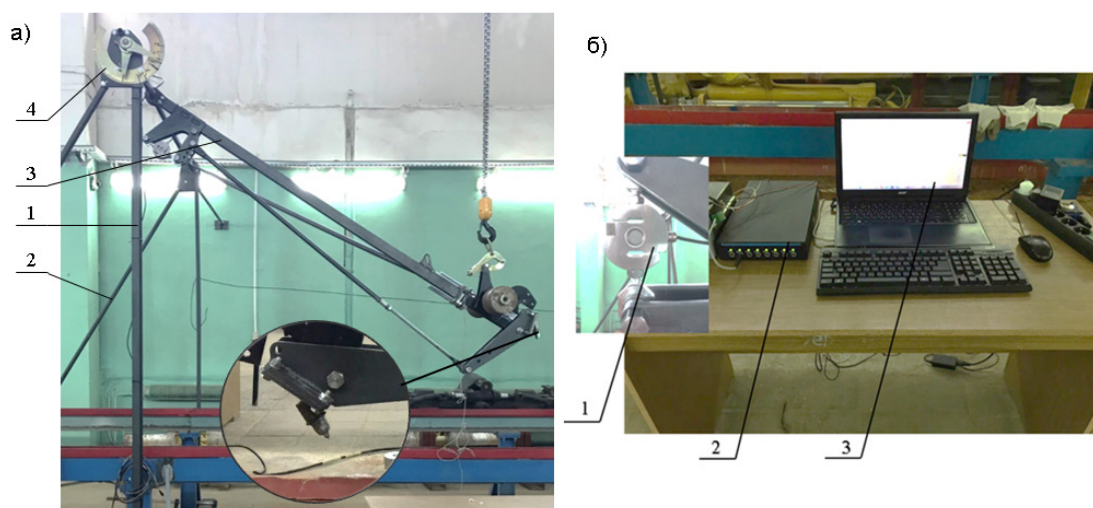


Рисунок 1 – Стенд маятникового типа:
а – конструкция маятника, б – измерительная система

Figure 1 – Desk type pendulum:
a – pendulum structure, b – measuring system

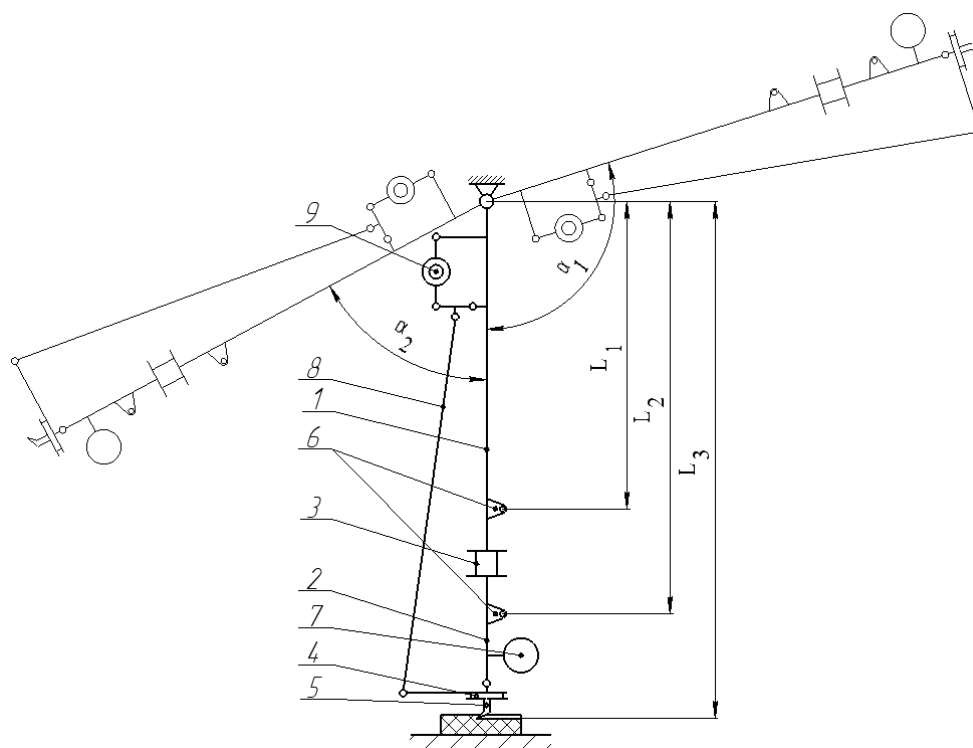


Рисунок 2 – Схема маятникового рычага

Figure 2 – A diagram of a pendulum lever

Измерительная система (рисунок 1, б) выбрана с учетом требований по чувствительности датчика, скорости записи, возможности анализа полученных результатов и возможности фильтрации сигнала. Система состоит из датчика растяжения–сжатия 1, тензометрической станции 2 и персонального компьютера 3. Сигналы, поступающие с датчика, обрабатываются станцией и отображаются на экране ПК. В качестве датчика выступает S-образный тензометрический датчик С2НС3 производства ЗАО «Весоизмерительная компания «Тензо-М» (пос. Красково, Московская обл.), тензометрическая станция – анализатор спектра ZET 017-U8 производства компании ZETLAB (г. Зеленоград, Московская обл.). Питание анализатора спектра и тензодатчика осуществлялось от сети переменного тока 220В с использованием преобразователя напряжения. Результаты измерений отображались в реальном времени на экране ноутбука и записывались на жесткий диск для последующей обработки с помощью программного обеспечения ZETLAB версия 2019.03.31.

В ходе эксперимента предполагалось изменение температуры материала образцов

асфальтобетона для более детального моделирования реальных условий работы фрезерного оборудования. Для этого использовалось несколько видов оборудования: сушильный шкаф SNOL 58/350 и морозильный ларь СНЕЖ МЛ-350 с дополнительным терморегулятором. Образцы выдерживались в камерах до заданных температур не менее двух часов.

Методика определения работы касательной составляющей силы сопротивления резанию опирается на определение потери кинетической энергии маятника в процессе удара:

$$K - K_0 = \sum A_j, \quad (1)$$

где K – кинетическая энергия, соответствующая началу процесса резания, Дж;
 K_0 – кинетическая энергия в момент выхода резца из зоны резания, Дж.

Пренебрегая сопротивлениями в подшипниках, можно записать

$$\sum A_j = A_p, \quad (2)$$

где A_p – работа касательной составляющей силы сопротивления резанию, Дж.

Кинетическая энергия к моменту резания определяется потенциальной энергией при подъеме маятника:

$$K = m \cdot g \cdot h, \quad (3)$$

где h – высота сбрасывания маятника, м;
 m – масса ударной части маятника, кг.

Кинетическая энергия после процесса резания определяется потенциальной энергией маятника, находящегося в максимально высокой точке после удара:

$$K_0 = m \cdot g \cdot h_0, \quad (4)$$

где h_0 – высота, на которую отбрасывается рабочая часть маятника после совершения работы резания, м.

На лимбах маятника фиксируются угол сбрасывания и угол отклонения после удара (рисунок 3). Высоту сбрасывания h можно определить зависимостью

$$h = L_3 - L_3 \cdot \cos \alpha_1 = L_3 \cdot (1 - \cos \alpha_1), \quad (5)$$

где α_1 – угол сбрасывания;

L_3 – расстояние от оси вращения маятника до точки контакта режущего элемента с материалом, м (см. рисунок 2).

Аналогично определяется высота отклонения h_0 :

$$h_0 = L_3 - L_3 \cdot \cos \alpha_2 = L_3 \cdot (1 - \cos \alpha_2), \quad (6)$$

где α_2 – угол отклонения.

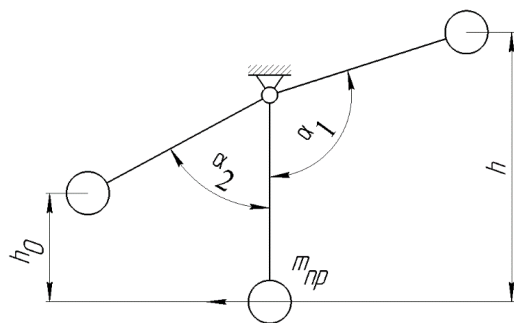


Рисунок 3 – Схема маятника для определения кинетической энергии процесса резания

Figure 3 – A diagram of a pendulum for the determination of kinetic energy of a cutting process

Усредненная работа касательной составляющей силы резания единицей резцом определяется как разница между потенциальными энергиями в момент наибольшего отклонения маятника до удара и после удара

$$A = m_{\text{пр}} \cdot g \cdot (h - h_0), \quad (7)$$

где $m_{\text{пр}}$ – приведенная масса, кг.

Так как массы маятника распределены неравномерно по длине маятника, очень важно найти физический эквивалент, позволяющий перейти к математическому маятнику. Таким эквивалентом служит приведенная масса, которая определяется следующим образом:

$$m_{\text{пр}} = \frac{T^2 \cdot M}{4 \cdot \pi^2 \cdot L_3^2}, \quad (8)$$

где T – период колебаний физического маятника, с;

M – статический момент маятника, Н·м.

Величина M определялась экспериментально путем подвешивания маятника в различных точках.

Представив некоторые математические выкладки, перейдем к рассмотрению экспериментальной части. Резание образцов на маятниковом стенде осуществляется следующим образом:

1) маятник взводится по лимбу на определенный угол, соответствующий требуемой скорости в момент удара;

2) при помощи специального механизма производится сбрасывание маятника, который совершает круговое движение вокруг оси крепления;

3) набирая необходимую скорость, резец входит в зону резания материала, осуществляет резание материала на заданную глубину и выходит из зоны резания материала;

4) в этот момент одновременно производится передача усилия через систему рычагов на тензометрический датчик и съем показаний с датчика в реальный момент времени, которые впоследствии обрабатываются тензометрической станцией, по значениям которого возможно определение силы сопротивления резанию.

В ходе эксперимента измерялись мгновенные значения касательных составляющих сил сопротивления резанию, развиваемые на датчике и усредненные значения этой силы. Последнее значение определялось по зависимости

$$F_{\text{срх}} = \frac{A}{b}, \quad (9)$$

где b – длина образца, м.

Образцы предварительно термостатировались до температур 10 °С, 30 °С и 50 °С. Зна-

чение касательных составляющих сил сопротивления резанию измерялось при толщинах срезаемой стружки 3, 5 и 7 мм.

Для проведения эксперимента были использованы образцы асфальтобетона марок Б-2⁶, (песчаный, фракция до 5 мм, битум марки БНД 130/200⁷), В-3 (песчаный, фракция до

5 мм, битум марки БНД 90/130), МЗП-2 (мелкозернистый, фракция до 10 мм, битум марки МГ 70/130⁸), ЩМА-20 (щебеночно-мастичный, фракция до 20 мм, битум марки СГ 70/130), которые в последующем были зафиксированы в отдельных коробах для жесткого закрепления на станине станда.

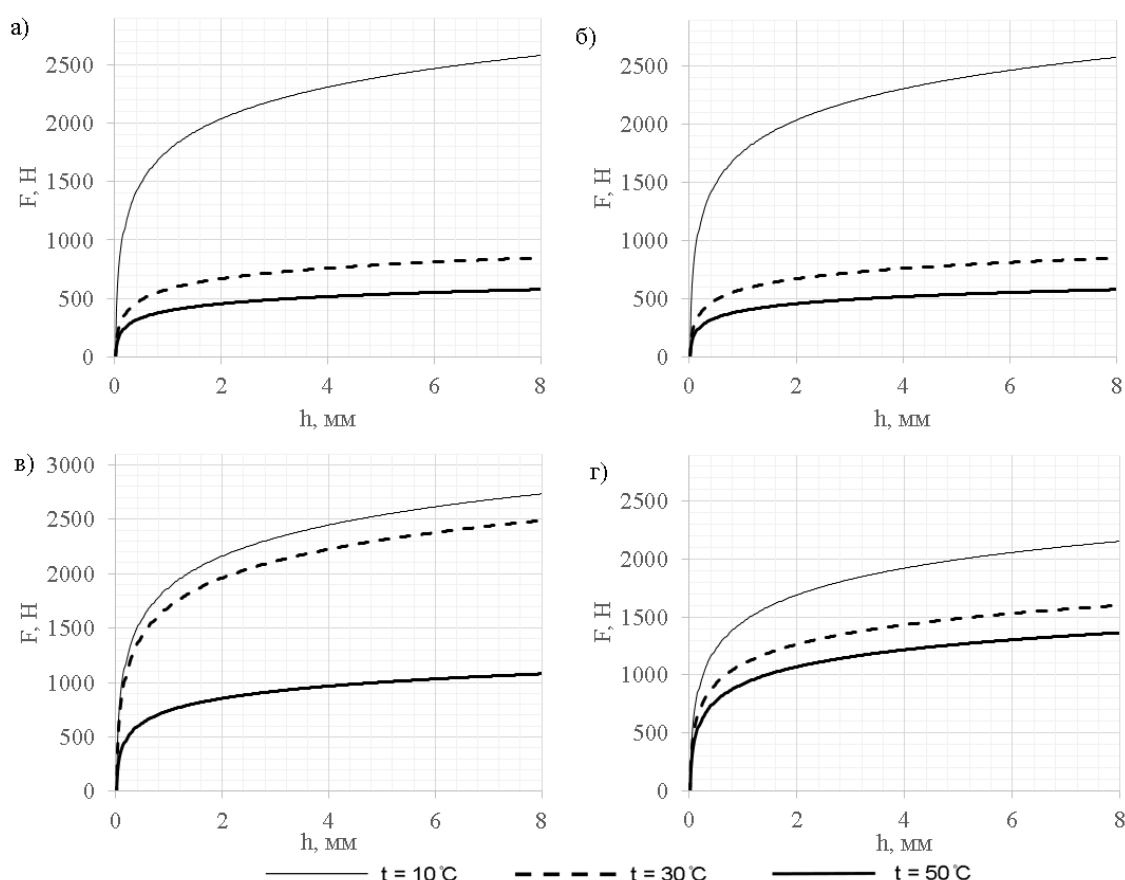


Рисунок 4 – Графики изменения усредненных сил резания при различной температуре материала образцов: а – при резании образцов асфальтобетона марки Б-2, б – при резании образцов асфальтобетона марки В-3, в – при резании образцов асфальтобетона марки МЗП-2, г – при резании образцов асфальтобетона марки ЩМА-20

Figure 4 – Graphs of change of the averaged cutting strengthes at different temperature of a sample material: а – when cutting samples of the asphalt concrete of Б-2 type, б – when cutting samples of the asphalt concrete of В-3 type, в – when cutting samples of the asphalt concrete of МЗП-2 type, г – when cutting samples of the asphalt concrete of ЩМА-20 type

⁶ ГОСТ 9128–2013 Смеси асфальтобетонные, полимер-асфальтобетонные, асфальтобетон, полимер-асфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. (Введен 01.11.2014, Москва, Стандартинформ, 2014).

⁷ ГОСТ 22245–90 Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия. (Введен 01.01.1991, Москва, ИПК Издательство стандартов,

⁸ ГОСТ 11955–82 Битумы нефтяные дорожные жидкие. Технические условия. (Введен 01.01.1984, Государственный стандарт союз ССР, 2010).

Таблица
Зависимости усредненных сил резания от толщины срезаемой стружки и температуры материала образцов

Table
The dependencies of averaged cutting strengthes
on a cut chips thickness and a sample material temperature

Марка асфальтобетона Asphalt concrete grade	Уравнение регрессии Regression equation	Коэффициент достоверности аппроксимации, R^2 Approximation validity factor, R^2
Б-2	$F_{\text{срх}} = 1971,06 \cdot h^{0,4464} \cdot t^{-0,4249}$	0,81
В-3	$F_{\text{срх}} = 43382,75 \cdot h^{0,6722} \cdot t^{-1,7557}$	0,87
МЗП-2	$F_{\text{срх}} = 4437,88 \cdot h^{0,2244} \cdot t^{-0,4304}$	0,81
ЩМА-20	$F_{\text{срх}} = 900,38 \cdot h^{0,4524} \cdot t^{-0,0758}$	0,76

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка мощности привода фрезерного барабана и энергоемкости рабочего процесса фрезерования может быть осуществлена только при известных средних значениях касательных составляющих сил сопротивления резанию. Определение численных значений этих сил возможно по интегральному показателю – работе сил резания за определенный период.

Ниже приведены значения средних касательных составляющих сил сопротивления резанию, определенных по формуле (9).

Полученные графики (рисунок 4) хорошо показывают нелинейный характер роста сил сопротивления резанию в зависимости от толщины срезаемой стружки. Так, даже при незначительных толщинах срезаемой стружки значение касательной составляющей является достаточно высоким. В значительной степени на силы сопротивления резанию оказывает влияние температура материала, причем для зернистых асфальтобетонов это влияние проявляется в меньшей степени.

Регрессионные зависимости усредненных сил резания, которые могут быть использованы для расчетов при проектировании фрезерного оборудования, для асфальтобетонов различных марок, приведены в таблице.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая сложный характер процессов, возникающих в зоне резания, наибольшей достоверности соответствуют полученные экспериментальные данные. Построенные графики

и уравнения зависимости с большой точностью отражают зависимость сил сопротивления резанию от температуры материала и толщины срезаемой стружки, что подтверждается высоким значением коэффициента достоверности. Это позволяет использовать данные в практических целях.

По результатам эксперимента можно сделать несколько важных выводов:

- при проектировании новых машин и эксплуатации существующих с точки зрения повышения энергоэффективности оборудования следует избегать небольших толщин срезаемой стружки;
- эффективность процесса фрезерования практически всех типов асфальтобетонов увеличивается при температуре выше 30° C;
- энергоемкость процесса фрезерования существенно зависит от типа и марки асфальтобетона.

Полученные данные позволяют не только определять нагрузки на рабочий орган и энергоемкость процесса, но и обоснованно подходить к вопросам размещения режущих элементов на барабане, определять рациональную область режимов работы оборудования, решать задачи выбора режимов работы в зависимости от типа асфальтобетона и температуры.

Развитие данной области исследований может также лежать в области поиска новых, рациональных конструкций фрезерных рабочих органов с комбинированными или регулируемыми параметрами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вершинин А.В. Влияние неравномерности скорости резания мерзлого грунта подкопной машины на энергоемкость его разрушения // Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. С. 264.
2. Николаев В.А. Ориентировочный расчет мощности циклического резания грунта // Вестник СибАДИ. 2019. №3. С. 228—240. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-228-240>.
3. Чебан А.Ю. Экспериментальные исследования процесса разрушения породы резцами фрезерного рабочего органа // Вестник ТОГУ. 2012. №1. С. 125—128.
4. Bilgin N., Demircin M. A., Copur H. Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2006. №1(43). pp. 139–156.
5. Mostafavi S.S. Effect of attack angle on the pick performance in linear rock cutting // 45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium. 2011. URL: <https://www.researchgate.net/publication/287323602>. (дата обращения: 20.02.2020).
6. Peng-yu M., Yong-biao H., Xin-rong Z. Research on adaptive power control parameter of a cold milling machine // Simulation Modelling Practice and Theory. 2008. №9 (16). pp. 1136–1144.
7. Кабашев Р.А., Тургумбаев С.Д. Экспериментальные исследования процесса копания грунтов роторно-дисковыми рабочими органами под гидростатическим давлением // Вестник СибАДИ. 2016. №4(50). С. 23–28.
8. Берестов Е.И., Кутылко Р.И. Экспериментальные исследования резания грунта // Вестник Белорусско-Российского университета. 2009. №1(22). С. 92–100.
9. Бараташвили М.П. Определение влияющих факторов на режимы работы машины и их значение для разрушения поверхностных слоев асфальтобетонных покрытий // Научный электронный архив. URL: <http://econf.rae.ru/article/6606>. (дата обращения: 10.01.2020).
10. Wang X. Bin, Hu Y.B., Lu P.Z. Calculation model and test correction of single tool's milling resistance force of asphalt concrete // Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/306182889>. (дата обращения: 10.01.2020).
11. Liu C.S., Li D.G. Mathematical model of cutting force based on experimental conditions of single pick cutting // Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society. 2011. URL: <https://www.researchgate.net/publication/286723599>. (дата обращения: 10.01.2020).
12. Николаев В.А. Анализ циклического резания грунта // Вестник СибАДИ. 2019. №16(6). С. 642—657. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657>
13. Вершинин А.В., Ерасов И.А., Левшунов Л.С., Янкович А.В. Влияние неравномерности скорости резания мерзлого грунта подкопной машины на энергоемкость его разрушения // Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. С. 264–270.
14. Семкин Д.С. О влиянии рабочих органов землеройных машин на силу сопротивления грунта резанию // Вестник СибАДИ. 2017. №1(53). С. 37–43. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1\(53\)-37-43](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-37-43)
15. Hu Y.B., Ma P.Y., Zhang X.R. Modelling and simulating of cold milling machine // Chang'an Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Chang'an University (Natural Science Edition). 2008. URL: <https://www.researchgate.net/publication/298243176>. (дата обращения: 13.01.2020).
16. Wang X., Hu Y. Numerical calculation on multi-tool milling resistance of asphalt pavement milling machine // Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/Journal of Xi'an Jiaotong University. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/306193701>. (дата обращения: 13.01.2020).
17. Wu J. Milling process simulation of old asphalt mixture by discrete element // Construction and Building Materials. 2018. URL: <https://www.researchgate.net/publication/327174408>. (дата обращения: 13.01.2020).
18. Gu H.R. Analysis and test on asphalt milling machine cutting load characteristic // Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport. 2012. URL: <https://www.researchgate.net/publication/293077475>. (дата обращения: 13.01.2020).
19. Peng-Yu M., Yong-Biao H., Zhong-Hai Z. The dynamical model of a cold milling machine and its adaptive power control simulation // SIMULATION. 2011. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0037549710371385>. (дата обращения: 13.01.2020).
20. Lu Z. Experimental and Numerical Studies on Rock Cutting with Saw Blade and Conical Pick Combined Cutting Method // Mathematical Problems in Engineering. 2019. URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2019/5046873>. (дата обращения: 13.01.2020).
21. Rojek J. Discrete element simulation of rock cutting // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2011. №6(48). С. 996–1010. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160911001043?via%3Dihub>. (дата обращения: 25.03.2020).
22. Pryhorovska T.O., Chaplinskiy S.S., Kudriavtsev I.O. Finite element modelling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits // Petroleum Exploration and Development. 2015. URL: <https://www.researchgate.net/publication/322947300> Finite element modeling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits. (дата обращения: 25.03.2020).
23. Su O., Ali Akcin N. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2011. №3(48). pp. 434–442. URL: https://www.academia.edu/4332254/Discrete_element_simulation_of_rock_cutting. (дата обращения: 25.03.2020).
24. Kotwica K. Atypical and innovative tool, holder and mining head designed for roadheaders used to tunnel and gallery drilling in hard rock // Tunneling and Underground Space Technology. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779818303419?via%3Dihub>. (дата обращения: 24.03.2020).

25. Liu S. Experimental research on wear of conical pick interacting with coal-rock // *Engineering Failure Analysis*. 2017. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630716311190?via%3DiHub>. (дата обращения: 24.03.2020).

26. Попов С.Н., Антонюк Д.А. Исследование влияния внешних условий изнашивания на износостойкость резцов дорожной фрезы // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2008. №1. С. 25–29.

27. Hekimoglu O.Z. Suggested methods for optimum rotative motion of point attack type drag tools in terms of skew angles // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/336811965>. (дата обращения: 13.01.2020).

28. Park J.Y. A study on rock cutting efficiency and structural stability of a point attack pick cutter by lab-scale linear cutting machine testing and finite element analysis // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160916305445?via%3DiHub>. (дата обращения: 31.01.2020).

REFERENCES

1. Vershinin A.V. Vliyanie neravnomernosti skorosti rezanija merzlogo grunta podkopochnoj mashiny na jenergoemkost' ego razrushenija [The influence of the unevenness of cutting speed of frozen soil of a digging machine on the energy intensity of its destruction]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014; №6: 264 (in Russian).

2. Nikolaev V.A. Approximate calculation of the circular soil cutting capacity. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019; 3: 228–240. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-228-240>. (in Russian)

3. Cheban A.YU. Jeksperimental'nye issledovaniya processa razrushenija porody rezcami frezernogo rabocheho organa [The experimental studies of the process of a rock destruction by cutters of the milling working element]. *Vestnik TOGU*. 2012; 1: 125–128 (in Russian).

4. Bilgin N., Demircin M. A., Copur H. Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006; 1(43): 139–156.

5. Mostafavi S.S. Effect of attack angle on the pick performance in linear rock cutting. *45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*. 2011. URL: <https://www.researchgate.net/publication/287323602>. (accessed: 20.02.2020).

6. Peng-yu M., Yong-biao H., Xin-rong Z. Research on adaptive power control parameter of a cold milling machine. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2008; 9(16): 1136–1144.

7. Kabashev R.A., Turgumbaev S.D. Jeksperimental'nye issledovaniya processa kopanija gruntov rotornno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [The experimental studies of the process of digging soils by rotary-disk working elements under hydrostatic pressure]. *Vestnik SibADI*. 2016; 4 (50): 23–28 (in Russian).

8. Berestov E.I., Kutynko R.I. Jeksperimental'nye issledovaniya rezanija grunta [The experimental studies of soil cutting]. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2009; 1(22): 92–100 (in Russian).

9. Baratashvili M.P. Opredelenie vlijajushhih faktorov na rezhimy raboty mashiny i ih znachenie dlja razrushenija poverhnostnyh sloev asfal'tobetonnyh pokrytij [The determination of influencing factors on machine operating conditions and their significance for the destruction of surface layers of asphalt concrete coatings]. *Nauchnyj elektronnyj arhiv*. URL: <http://econf.rae.ru/article/6606>. (accessed: 01.10.2020) (in Russian).

10. Wang X. Bin, Hu Y.B., Lu P.Z. Calculation model and test correction of single tool's milling resistance force of asphalt concrete. *Zhongguo Gonglu Xuebao / China Journal of Highway and Transport*. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/306182889>. (accessed: 10.01.2020).

11. Liu C.S., Li D.G. Mathematical model of cutting force based on experimental conditions of single pick cutting. *Meitan Xuebao / Journal of the China Coal Society*. 2011. URL: <https://www.researchgate.net/publication/286723599>. (accessed: 10.01.2020).

12. Nikolaev V.A. Analiz ciklicheskogo rezanija grunta [The analysis of cyclic soil cutting]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019. №16(6). Pp. 642–657. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657> (in Russian).

13. Vershinin A.V., Erasov I.A., Levshunov L.S., Yankovich A.V. Vliyanie neravnomernosti skorosti rezanija merzlogo grunta podkopochnoj mashiny na jenergoemkost' ego razrushenija [The influence of the unevenness of a cutting speed of frozen soil of a digging machine on the energy intensity of its destruction]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014; 6: 264–270 (in Russian).

14. Semkin D.S. O vlijanii rabochnih organov zemlerojnyh mashin na silu soprotivlenija grunta rezaniju [About the influence of the working elements of an earth-moving machinery on the strength of soil resistance to cutting]. *Vestnik SibADI*. 2017; 1(53): 37–43. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1\(53\)-37-43](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-37-43) (in Russian).

15. Hu Y.B., Ma P.Y., Zhang X.R. Modelling and simulating of cold milling machine. *Chang'an Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) / Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*. 2008. URL: <https://www.researchgate.net/publication/298243176>. (accessed: 13.01.2020).

16. Wang X., Hu Y. Numerical calculation on multi-tool milling resistance of asphalt pavement milling machine. *Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh / Journal of Xi'an Jiaotong University*. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/306193701>. (accessed: 13.01.2020).

17. Wu J. Milling process simulation of old asphalt mixture by discrete element. *Construction and Building Materials*. 2018. URL: <https://www.researchgate.net/publication/327174408>. (accessed: 13.01.2020).

18. Gu H.R. Analysis and test on asphalt milling machine cutting load characteristic. *Zhongguo Gonglu Xuebao / China Journal of Highway and Transport*. 2012. URL: <https://www.researchgate.net/publication/293077475>. (accessed: 13.01.2020).

19. Peng-Yu M., Yong-Biao H., Zhong-Hai Z. The dynamical model of a cold milling machine and its adaptive power control simulation. *SIMULATION*. 2011. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0037549710371385>. (accessed: 13.01.2020).

20. Lu Z. Experimental and Numerical Studies on Rock Cutting with Saw Blade and Conical Pick Combined Cutting Method. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2019/5046873>. (accessed: 13.01.2020).

21. Rojek J. Discrete element simulation of rock cutting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011; 6(48): 996–1010.

22. Pryhorovska T.O., Chaplinskiy S.S., Kudriavtsev I.O. Finite element modelling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits. *Petroleum Exploration and Development*. 2015. URL: <https://www.researchgate.net/publication/322947300>. (accessed: 25.03.2020).

23. Su O., Ali Akcin N. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011; 3(48): 434–442.

24. Kotwica K. Atypical and innovative tool, holder and mining head designed for roadheaders used to tunnel and gallery drilling in hard rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779818303419?via%3Dihub>. (accessed: 24.03.2020).

25. Liu S. Experimental research on wear of conical pick interacting with coal-rock. *Engineering Failure Analysis*. 2017. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630716311190?via%3Dihub>. (accessed: 24.03.2020).

26. Popov S.N., Antonyuk D.A. Issledovanie vliyaniya vneshnih uslovij iznashivaniya na iznosostojkost' rez-cov dorozhnoj frezy [The study of the influence of external wear conditions on the wear resistance of cutters of a road mill]. *Novi materiali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*. 2008; 1: 25–29.

27. Hekimoglu O.Z. Suggested methods for optimum rotative motion of point attack type drag tools in terms of skew angles. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/336811965>. (accessed: 13.01.2020).

28. Park J.Y. A study on rock cutting efficiency and structural stability of a point attack pick cutter by lab-scale linear cutting machine testing and finite element analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160916305445?via%3Dihub>. (accessed: 31.01.2020).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фурманов Денис Владимирович – Организация работы авторского коллектива, формирование направления и формулирование проблемы исследования, постановка задач и методики проведения исследования, разработка и создание испытательного стенда, корректирование материала статьи.

Чижов Владимир Сергеевич – Обзор предыдущих исследований, разработка и создание испытательного стенда, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка материала для статьи.

Лысаков Никита Эдуардович – Разработка и создание испытательного стенда, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Denis V. Furmanov – Corporate author organization work, areas formation and the problem in the study formulation, objectives and methods of research setting, a test stand development and creation, the material of the article correction.

Vladimir S. Chizhov – Review of previous studies, a test stand development and creation, of experimental studies preparation and testing, the obtained data processing, the material for the article preparation.

Nikita E. Lysakov – A Test stand development and creation, experimental studies preparation and testing, the obtained data processing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фурманов Денис Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные и дорожные машины», ORCID 0000-0002-6932-6477, Ярославский государственный технический университет (150023, Россия, г. Ярославль, Московский пр., 88, e-mail: denis_furmanov@mail.ru).

Чижов Владимир Сергеевич – ассистент кафедры «Строительные и дорожные машины», ORCID 0000-0003-0202-4885, Ярославский государственный технический университет (150023, Россия, г. Ярославль, Московский пр., 88, e-mail: volodymyrtchizhoff@yandex.ru).

Лысаков Никита Эдуардович – студент кафедры «Строительные и дорожные машины», Ярославский государственный технический университет (150023, Россия, г. Ярославль, Московский пр., 88, e-mail: war788game@mail.ru).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Denis V. Furmanov – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor of the Department of Construction and Road Machines, ORCID 0000-0002-6932-6477, Yaroslavl State Technical University (150023, Russia, Yaroslavl, Moskovskii Prospect 88, e-mail: denis_furmanov@mail.ru).

Vladimir S. Chizhov – Assistant of the Department of Construction and Road Machines, ORCID 0000-0003-0202-4885, Yaroslavl State Technical University (150023, Russia, Yaroslavl, Moskovskii Prospect 88, e-mail: volodymyrtchizhoff@yandex.ru).

Nikita E. Lysakov – Student of the Department of Construction and Road Machines, Yaroslavl State Technical University (150023, Russia, Yaroslavl, Moskovskii Prospect 88, E-mail: war788game@mail.ru).