

УДК 625.089.21

<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-170-182><https://elibrary.ru/HJJGVA>

Научная статья



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ ДОРОЖНОЙ ФРЕЗЫ

Д. В. Фурманов, Н. Э. Лысаков*, Л. М. Шамахов*Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия**<http://orcid.org/0000-0002-6932-6477>, denis_furmanov@mail.ru**<http://orcid.org/0000-0001-6646-7947>, nik.lysakov.1997@mail.ru**<http://orcid.org/0000-0001-7559-282X>, leonid.shamakhov@yandex.ru***ответственный автор*

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена результатам исследования сопротивления резанию дорожных асфальтобетонов в процессе удаления изношенных покрытий рабочими органами фрезерных машин. Актуальность работы обусловлена появлением новых марок асфальтобетонов и новых типов режущих элементов, для которых затруднительно прогнозировать нагрузки на рабочем органе при решении задач проектирования новых и обосновании режимов работы существующих машин.

Цель. Расчет параметров рабочего органа дорожной фрезы.

Материалы и методы. Экспериментальные работы проводились путем определения горизонтальной и вертикальной составляющих силы сопротивления резания асфальтобетонов. Исследования проводились на механическом стенде с подвижной плитой, с применением регистрирующей аппаратуры. Производилось разрушение четырех различных марок асфальтобетона. Для каждой марки материала проведен двухфакторный эксперимент. Производилось определение горизонтальной и вертикальной составляющих сил сопротивления резанию в зависимости от площади сечения стружки, марки асфальтобетона и типа режущего элемента.

Результаты. В результате проведения эксперимента получены данные, позволяющие обоснованно определять нагрузки на рабочем органе дорожной фрезы. Доказано, что зависимость сил сопротивления резания от площади сечения стружки режущего элемента имеет нелинейный характер. Полученные данные позволяют исчерпывающе ответить на вопросы, касающиеся обоснования параметров дорожных фрез.

Обсуждение и заключение. Полученные данные позволяют разработать математическую модель процесса фрезерования асфальтобетонов, которая даст возможность определять не только нагрузки на рабочий орган и энергоемкость процесса, но и обоснованно подходить к вопросам размещения режущих элементов на барабане, определять рациональную область режимов работы оборудования и решать задачи выбора режимов работы в зависимости от типа асфальтобетона.

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

Статья поступила в редакцию 17.03.2022; одобрена после рецензирования 30.02.2022; принята к публикации 12.04.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Фурманов Д. В., Лысаков Н. Э., Шамахов Л. М. Экспериментально-аналитическое обоснование процесса резания асфальтобетонов рабочим оборудованием дорожной фрезы // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 2(84). С. 170-182. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-170-182>

© Фурманов Д. В., Лысаков Н. Э., Шамахов Л. М., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-170-182>

<https://elibrary.ru/HJJGVA>

Original article

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL JUSTIFICATION OF ASPHALT CONCRETE CUTTING PROCESS BY ROAD MILLING MACHINE WORKING EQUIPMENT

Denis V. Furmanov, Nikita E. Lysakov*, Leonid M. Shamakhov

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

<http://orcid.org/0000-0002-6932-6477>, denis_furmanov@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0001-6646-7947>, nik.lysakov.1997@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0001-7559-282X>, leonid.shamakhov@yandex.ru

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to the results of a study of the cutting resistance of road asphalt concrete in the process of removing worn coatings by the working bodies of milling machines. The relevance of the work is due to the emergence of new grades of asphalt concrete and new types of cutting elements, for which it is difficult to predict the loads on the working body when solving the problems of designing new and justifying the operating modes of existing machines.

Purpose. To calculate the parameters of the working body of the road milling machine.

Materials and methods. The experimental work was carried out by determining the horizontal and vertical components of the resistance force of cutting asphalt concrete. The research was carried out on a mechanical stand with a movable plate, using recording equipment. Four different grades of asphalt concrete were destroyed. A two-factor experiment was conducted for each brand of material. The horizontal and vertical components of the cutting resistance forces were determined depending on the chip cross-sectional area, the grade of asphalt concrete and the type of cutting element.

Results. As a result of the experiment, data were obtained that make it possible to reasonably determine the loads on the working body of the road milling machine. It is proved that the dependence of the cutting resistance forces on the chip cross-sectional area of the cutting element has a nonlinear character. The data obtained allow to comprehensively answer questions concerning the justification of the parameters of road milling machines.

Discussion and conclusion. The obtained data allow to develop a mathematical model of the asphalt concrete milling process which will make possible to determine not only the loads on the working body and the energy intensity of the process, but also to reasonably approach the placement of cutting elements on the drum, determine the rational range of equipment operating modes and solve the problems of choosing operating modes depending on the type of asphalt concrete.

KEYWORDS: asphalt concrete, milling drum, cutting resistance force, pendulum stand, thickness of the cut off chips, energy consumption of the cutting process.

The article was submitted 17.03.2021; approved after reviewing 29.03.2022; accepted for publication 12.04.2022.

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 Denis V., Lysakov Nikita E., Shamakhov Leonid M. Experimental and analytical justification of the asphalt concrete cutting process by road milling machines working equipment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (2): 170-182. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-170-182>

© Furmanov D. V., Lysakov N. E., Shamakhov L. M., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Ремонт дорожного полотна не обходится без машин с фрезерным оборудованием. Процесс фрезерования асфальтобетона довольно энергоемкий. Фрезерование асфальтобетона сопровождается возникновением сил сопротивления резанию на режущих элементах фрезерного барабана. Численные значения этих сил зависят от толщины и формы срезаемой стружки, температуры материала его типа асфальтобетона и скорости резания.

Задачи создания новых машин и повышение эффективности существующих требуют решения численного моделирования процесса фрезерования с использованием обоснованной математической модели и создания программного комплекса для расчета параметров рабочего органа. Для реализации этой задачи необходимо смоделировать процесс фрезерования с достаточной точностью. К сожалению, таких существующих математических моделей в открытых источниках в настоящее время 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 поверхности барабана для определения суммарных сил и крутящего момента. Если вторая часть задачи решается геометрическим моделированием, решение которого хорошо отражено, например, в работах [1, 2], то методы получения численных значений составляющих сил сопротивлению резания далеко не так очевидны.

С методической точки зрения полезными являются экспериментальные работы по исследованию процессов резания различных дорожно-строительных материалов, так как они позволяют получить максимально достоверные результаты, пригодные для практического применения.

А. Н. Зелениным¹ для определения горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию P незначительными по размеру режущими элементами предложена зависимость

$$P = 10 \cdot c \cdot h \cdot (1 + 0,55 \cdot s) \cdot \left(1 - \frac{90-\alpha}{150}\right) \cdot \mu \cdot \Delta, \quad (1)$$

где h – глубина резания;

s – ширина профиля;

μ – коэффициент влияния степени блокирования, для заблокированного резания $\mu = 1$, для полублокированного резания $\mu = 0,75$, для свободного резания $\mu = 0,5$;

Δ – коэффициент, учитывающий влияние износа режущего инструмента;

α – передний угол резания.

Показателем, характеризующим прочностные свойства грунта, является параметр σ . Этот параметр равен количеству ударов стандартного ударника при забивании наконечника на заданную глубину. Это позволяет заменить широчайший спектр существующих грунтов, различных по гранулометрическому составу, свойствам, температуре, связности и т. д. одним показателем, характеризующим прочностные свойства.

Элементы данного подхода могут быть применимы и к теории резания асфальтобетона.

В своих исследованиях по резанию разогретых асфальтобетонов А. Я. Александров² отмечает, что сила резания во многом определяется количеством крупных минеральных зерен. Для определения горизонтальной составляющей силы резания предлагается следующая зависимость:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{л.р.к}} + P_{\text{л.з.р.к}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{л.р.к}}$ – сила резания, обусловленная силами трения и внутренним сцеплением среды и минеральных зерен, крупностью менее 2 мм;

$P_{\text{л.з.р.к}}$ – сила сопротивления при раскалывании минеральных зерен, касающихся режущей кромки ножа.

Первую составляющую силы резания А. Я. Александров находит, опираясь на результаты работы А. М. Холодова³:

$$P_{\text{л.р.к}} = \frac{B \cdot h \cdot \sin(\alpha + \varphi_1) \cdot [\gamma_0 \cdot c \cdot \sin(\alpha + \omega) \cdot \sin(\omega + \varphi) + 0,5 \cdot \sigma \cdot c \cdot \varphi]}{\sin \omega \cdot \sin(\alpha + \omega + \varphi + \varphi_1)}, \quad (3)$$

где γ_0 – объемная масса плотного грунта;

φ – угол внутреннего трения;

φ_1 – угол внешнего трения;

α – угол резания;

ω – угол наклона плоскости сдвига;

h – толщина срезаемой стружки;

B – ширина ножа;

c – сцепление среды.

¹ Зеленин А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. М., Машиностроение, 1968.

² Александров А. Я. Выбор рациональной температуры асфальтобетона. Сб. «Автомобильный транспорт и дороги», К.: Техника, 1971. С. 53–56.

³ Холодов А. М. Теоретическое выражение сопротивления грунтобетону резанию широким плоским ножом. Сб. Горные, строительные и дорожные машины, К., 1965, в. 1. С. 16–18.

Вторая составляющая зависимости (2) определяется уравнением

$$P_{л.з.р.к} = K_p \cdot B \cdot D \cdot \tau \cdot \frac{\sin(\gamma_{з.х} + \varphi_1)}{\cos \varphi}, \quad (4)$$

где K_p – коэффициент, учитывающий форму щебня, его гранулометрический состав и распределение в массиве;

D – средний диаметр фракции щебня;

$\gamma_{з.х}$ – угол захвата;

τ – предел прочности щебня при раскалывании.

Аналитические зависимости, предложенные автором указанной работы, безусловно, являются полезными с научной точки зрения, однако получить экспериментальное значение таких показателей, как угол внутреннего трения и угол внешнего трения для различных температур и марок асфальтобетона на практике не представляется возможным. Кроме того, в формуле (3) сложные процессы хрупкого разрушения заменяются достаточно упрощенной формулой разрушения от сдвиговой нагрузки.

Отметим также, что значения указанных составляющих силы сопротивления резанию имеют некий мгновенный характер, что затрудняет определение работы силы резания и, следовательно, энергетических параметров процесса.

Однако с научной точки зрения интересен экспериментальный комплекс работ, выполненный автором. Александровым были получены зависимости коэффициента сопротивления резания от ширины ножа при разработке разогретого асфальтобетона (рисунок 1). Это действительно те данные, которые можно использовать на практике при решении задач проектирования машин, однако они обладают рядом условностей. Во-первых, сам по себе подход, который позволяет заменять сложные процессы, возникающие на режущем элементе неким коэффициентом удельной нагрузки, вызывает спор. Так как на графике показано, что этот коэффициент принимает различные значения для различных ножей, говорить об адекватности данного подхода не приходится. Отметим так же, что результаты этих исследований непригодны для современных типов режущих элементов, где режущая часть представляет собой цилиндрический наконечник, закругляющийся в ходе эксплуатации в виде полусферы. Да и требования к прочности асфальтобетонов со времен указанных исследований существенно изменились.

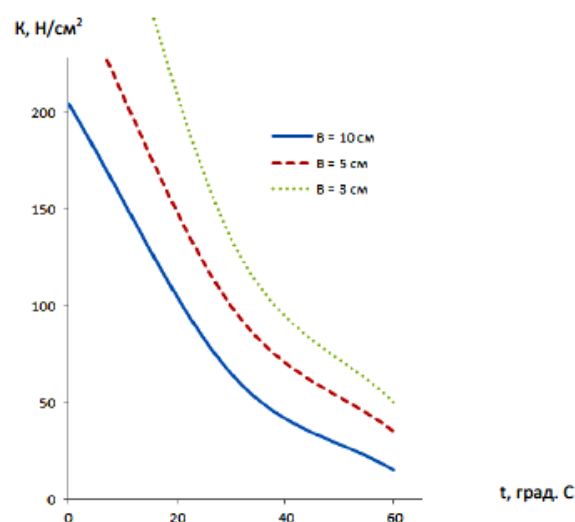


Рисунок 1 – Зависимость удельной силы резания для различных ножей от температуры асфальтобетона
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The dependence of the applied cutting force for various knives on the temperature of the asphalt concrete.
Source: compiled by the authors.

Значимыми факторами при определении нагрузок на рабочем органе являются прочностные и деформативные свойства обрабатываемого материала. В своей работе Ю. Г. Глебов⁴ предлагает определять силу резания следующей зависимостью:

$$P_p = k \cdot F_{ср} \cdot \sigma, \quad (5)$$

где k – безразмерный коэффициент сопротивления резанию, учитывающий особенности упруго-пластических свойств асфальтобетона;

$F_{ср}$ – суммарное среднее сечение стружки, определяемое одним оборотом фрезы;

σ – предел прочности асфальтобетона на одноосное сжатие.

Неработоспособность указанного подхода проявляется в том, что предел прочности стандартных образцов на одноосное сжатие ограничен сцеплением между отдельными зернами асфальтобетона. Однако на силу сопротивления резанию существенное влияние оказывает и прочность самих зерен, которые разрушаются в различной степени в процессе фрезерования.

⁴ Глебов Ю. Г., Губанцев А. В. Резание асфальтобетонного покрытия при ямочном ремонте дорог. Тр. Горьковского политехнического института, Горький, 1975. Т. 31, в. 8. С. 18–20.

С точки зрения практического использования обладают результаты экспериментальных исследований [3, 4], авторы которых подробно рассмотрели различные случаи установки режущих элементов и определили усилия, которые постоянно изменяются по величине в процессе резки из-за сколов и хрупкости породы.

Важными полученными данными из работы [5] были факторы, влияющие на энергопотребление холодного фрезерного станка и характеристики нагрузки двигателя.

Авторы работ [6, 7] подробно рассмотрели получение количественных значений нормальной и касательной составляющих сопротивления резания в процессе разработки прочных грунтов.

М. П. Бараташвили [8] приводит конкретные значения удельных нагрузок на режущий элемент. 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, которая заключается в получении зависимости удельного напряжения резания от угла резания и ширины режущего элемента.

Одним из недостатков указанных работ является неполное соответствие параметров рабочего процесса фрезерования стендовыми рабочими органами в сравнении с реальными машинами.

Аналитическое определение сил сопротивления резанию грунтов и прочных дорожно-строительных материалов отражены в работах [9, 10], авторы предложили новый метод определения мгновенной составляющей силы резания, возникающей на фрезерном барабане, в котором предложили три алгоритма модели сопротивления резанию. Авторы указывают на хорошую достоверность результатов.

Анализ и изучение скоростных характеристик, влияющих на процессы резания, представлены в исследованиях [11, 12], авторы впервые представили расчётные зависимости данных параметров для различных конструкций рабочих органов. Приведён расчёт, по результатам которого определены условия рационального применения того или иного типа установки фрезы в забое.

А. А. Машенский⁵ рассмотрел процессы, происходящие при скоростном резании грунтов. Установлена зависимость силы сопротивления грунта резанию от скорости взаимодействия с учетом сжимаемости грунта и возникновением силы волнового сопротивления. Привел аналитические зависимости для расчета составляющих полной силы сопротивления скоростного резания грунта. Аналогичные испытания, с разными типами режущих элементов проводились в работе [13].

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 [14]. Это подтверждает нелинейный характер изменения сил резания с увеличением толщины срезаемой стружки. Энергоэффективность фрезерной машины исследуется путем постановки полевого эксперимента в работе [15]. 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.

Работа [16] посвящена стойкости фрезерного инструмента. Применительно к асфальтовому бетону можно отнести исследование [17], 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 такое исследование проводилось в работе [18] на экспериментальной установке, для асфальтобетонных вопрос остается открытым.

С каждым годом появляется все больше асфальтобетонных новых марок. Небольшое изменение состава повлечет за собой существенное изменение сопротивляемости резания. Наряду с этим происходит модернизация режущих элементов. Однако применительно к

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.

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

Изучение процесса фрезерования целесообразно выполнять с исследования взаимодействия с материалом одного режущего элемента фрезерного барабана. Поэтому для обоснования возникающих нагрузок на режущем элементе был выбран экспериментальный подход.

С этой целью использовался консольный вертикально-фрезерный станок, который обеспечивает жесткость станины и, как следствие, геометрическую стабильность процесса. Появилась возможность определять силовые и энергетические характеристики процессов резания и дробления, возможность регулиро-

вания в широком диапазоне геометрических и динамических параметров процессов резания, таких как тип, способ установки и угол наклона режущего элемента и т. д.

Стенд состоит из вертикального консольно-фрезерного станка модели 6Р12П. На станке установлены: нижняя подвижная плита 1, для фиксации образцов асфальтобетона; линейная направляющая 2, обеспечивающая жесткость конструкции; два шариковых подшипника 3, предназначенных для возможности перемещения плиты относительно станины станка; кронштейн 4, к которому крепится горизонтальный S-образный датчик 5, соединенный с подвижной плитой. Кроме того, к конусу под шпindel 6 крепится верхний рычаг 7, передающий усилие на вертикальный S-образный датчик 8. Нижний рычаг 9 соединен со стойкой 10, на которой расположен резцедержатель 11 с режущим элементом. Общий вид стенда показан на рисунке 2, а.



а



б

Рисунок 2 – Экспериментальный стенд:
а – общий вид стенда для исследования процессов резания и динамического разрушения асфальтобетонов;
б – функциональная схема измерительной системы
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Experimental bench: а) – general view of the bench for studying the processes of cutting and dynamic destruction of asphalt concrete;
b) – functional diagram of the measuring system
Source: compiled by the authors.

Измерительная система (рисунок 2, б) разработана с учетом требований по чувствительности датчика, скорости записи, возможности анализа полученных результатов и возможности фильтрации сигнала. Система состоит из двух S-образных тензометрических датчиков растяжения-сжатия 5, 8, тензометрической станции 12 и персонального компьютера 13. Перед началом экспериментальных работ была произведена тарировка тензометрических датчиков.

В момент резания производится передача усилия через систему рычагов на регистрирующие датчики. Сигнал передается на усилитель с аналого-цифровым преобразователем и далее на персональный компьютер. Схема экспериментального стенда и силы, возникающих на режущем элементе, представлены на рисунке 3.

В ходе проведения опытов определялась зависимость сил резания от площади сечения стружки и характера её развития. Один из вариантов формирования сечения стружки представлен на рисунке 4.

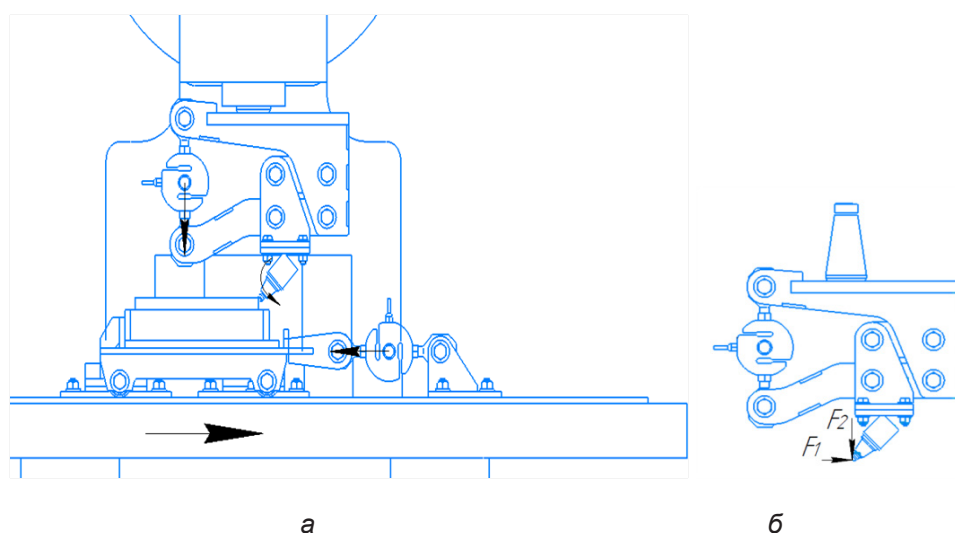


Рисунок 3 – Схема экспериментального стенда
а – общий вид; б – силы на режущем элементе
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Scheme of the experimental stand.
a) general view, b) force on the pass element
Source: compiled by the authors.

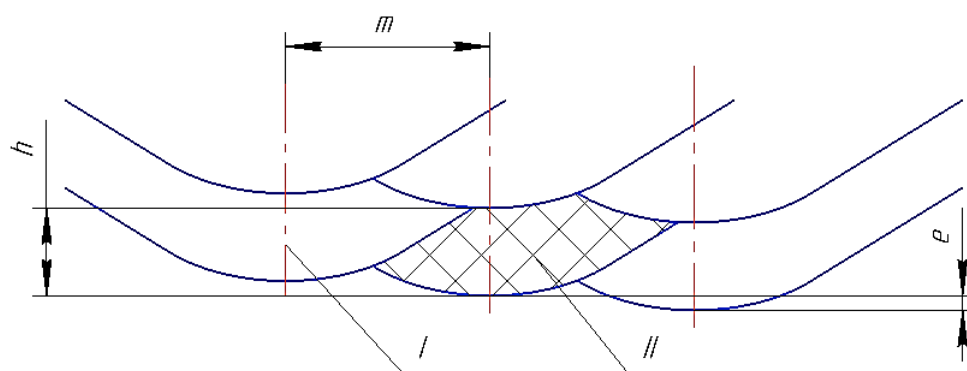


Рисунок 4 – Схема формирования сечения стружки
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Chip section formation diagram
Source: compiled by the authors.

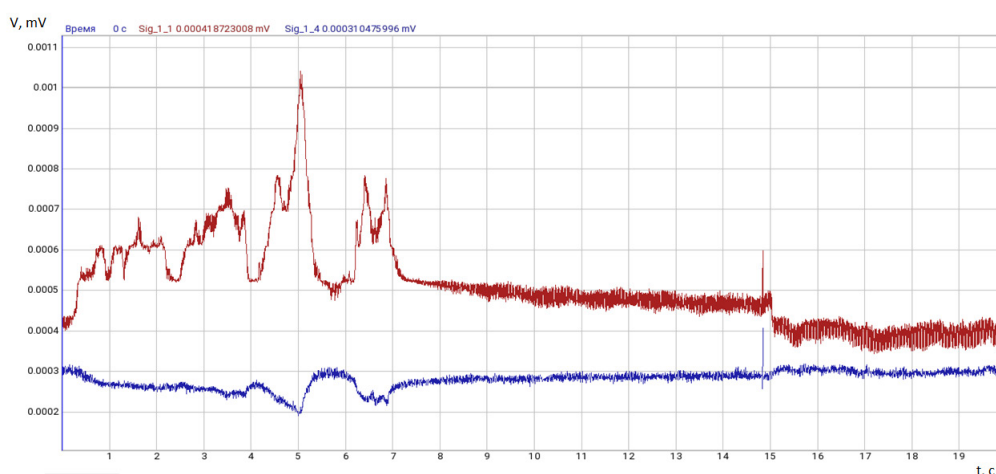


Рисунок 6 – Регистрация показаний тензометрических датчиков
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Registration of readings of strain gauges.
Source: compiled by the authors.

Проанализировав зависимость силы резания от площади сечения стружки резца, появляется возможность определить оптимальное количество режущих элементов на фрезерном барабане и их расположение.

Режущий элемент любого фрезерного рабочего органа в процессе взаимодействия с материалом совершает вращательное и поступательное движение, выраженное уравнением трохоиды. Геометрические параметры режущего элемента А6/20 [20] представлены на рисунке 5.

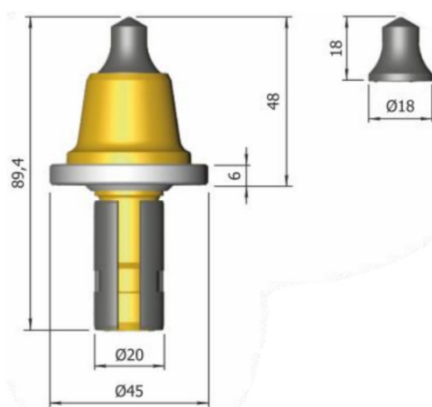


Рисунок 5 – Геометрические параметры режущего элемента⁶

Figure 5 – Geometrical parameters of the cutting element⁶

Экспериментальные работы производились в следующем порядке:

- 1) Производится установка образца и его фиксация.
- 2) При помощи ходовых винтов консольного вертикально-фрезерного станка устанавливается нужная глубина фрезерования.
- 3) Настраивается необходимая подача стола.
- 4) Происходит снятие стружки материала.

В ходе эксперимента происходила запись показаний с двух тензометрических датчиков (рисунок 6).

Наряду с регистрацией показаний происходил замер площади сечения стружки режущего элемента (рисунок 7).

С помощью кузовной линейки, с шириной пластин 1 мм, происходило копирование формы сечения стружки. Полученный результат с исходными данными фотографировался, а дальше в программном комплексе Компас 3Д, происходило масштабирование сечения стружки, с последующим определением площади, ширины и глубины сечения стружки.

⁶ ОАО «КЗТС». Оригинальная конструкция дорожных резцов. Режим доступа: http://www.kzts.ru/core/user_files/Road.pdf (дата обращения: 05.03.22).



Рисунок 7 – Пример определения площади сечения стружки
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – An example of determining the cross-sectional area of the chips
Source: compiled by the authors.

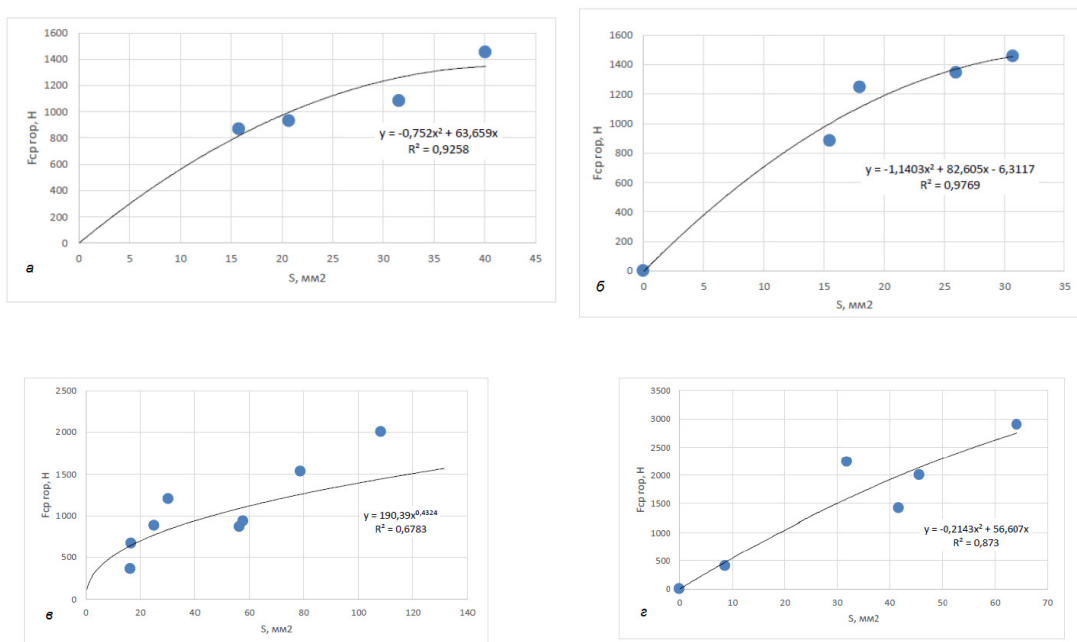


Рисунок 8 – Графики изменения горизонтальных сил резания при различной площади сечения стружки:
а – при резании образцов асфальтобетона марки Б-2;
б – при резании образцов асфальтобетона марки В-3;
в – при резании образцов асфальтобетона марки МЗП-2;
г – при резании образцов асфальтобетона марки ШМА-20
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Graphs of changes in horizontal cutting forces for different chip cross-sectional areas:
a) when cutting samples of asphalt concrete grade B-2;
b) when cutting samples of asphalt concrete grade V-3;
c) when cutting samples of asphalt concrete grade MZP-2;
d) when cutting samples of asphalt concrete grade ShMA-20
Source: compiled by the authors.

Таблица
Зависимости усредненных сил резания от площади следа резца
Источник: составлено авторами.

Table
Dependencies of averaged cutting forces on cutter trace area
Source: compiled by the authors.

Марка асфальтобетона	Уравнение регрессии	Коэффициент достоверности. R ²
В-3	$F_{гор} = -0.752 \cdot S^2 + 63.659 \cdot S$	R ² =0.9258
МЗП-2	$F_{гор} = 190.39 \cdot S^{0.4324}$	R ² =0.6783
Б-2	$F_{гор} = -1.1403 \cdot S^2 + 82.605 \cdot S - 6.3117$	R ² =0.9769
ЩМА-20	$F_{гор} = -0.2143 \cdot S^2 + 56.607 \cdot S$	R ² =0.873

Для проведения эксперимента были использованы образцы асфальтобетона марок Б-2, В-3, МЗП-2⁷ и ЩМА-20⁸.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка мощности привода фрезерного барабана и энергоемкости рабочего процесса фрезерования может быть осуществлена только при известных средних значениях горизонтальной составляющей сил сопротивления резанию. Полученные графики (рисунок 8) хорошо показывают нелинейный характер роста сил сопротивления резанию в зависимости от площади следа резца.

Вертикальная составляющая силы сопротивления резания не определяет энергетических характеристик машины, однако влияет на прочностные показатели фрезерного барабана и тягово-сцепные качества машины в целом. Установлено, что

$$F_b = (0.9 - 1.1) \cdot F_r. \quad (6)$$

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

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс фрезерования является сложным и многофакторным процессом. Благодаря полученным экспериментальным данным, были

выявлены уравнения зависимости, построены графики, отражающие зависимость сил сопротивления резанию от площади сечения стружки, что подтверждается высоким значением коэффициента достоверности.

По результатам эксперимента было сделано несколько выводов:

- установленные зависимости имеют нелинейный характер;
- опираясь на полученные регрессионные зависимости, было выявлено, что предыдущие исследования не в полной мере отражают определение значения силы резания;
- энергоемкость процесса фрезерования существенно зависит от типа и марки асфальтобетона;
- полученные данные являются исчерпывающими для составления математической модели и методики расчета фрезерного оборудования.

Полученные регрессионные зависимости 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.

На основании полученных данных не только можно, но и необходимо разработать математическую модель для расчета параметров рабочего оборудования дорожной фрезы.

⁷ ГОСТ 9128–2013 Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов.

⁸ ГОСТ 31015–2002 Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вершинин А. В. Влияние неравномерности скорости резания мерзлого грунта подкочной машины на энергоёмкость его разрушения // Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22877306> (дата обращения: 16.12.2020).

2. Николаев В. А. Ориентировочный расчёт мощности циклического резания грунта // *Вестник СибАДИ*. 2019. № 16(3). С. 228–240. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-228-240>

3. 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). С. 139–156. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160905000572?via%3Dihub>. (дата обращения: 20.03.2020).

4. 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: 20.03.2020).

5. 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). С. 1136–1144. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1569190X08001184?via%3Dihub>. (дата обращения: 20.03.2020).

6. 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.

7. Берестов Е. И., Кутылко Р. И. Экспериментальные исследования резания грунта // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2009. №1(22). С. 92–100. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-rezaniya-grunta/viewer> (дата обращения: 20.03.2020).

8. 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).

9. 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).

10. 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).

11. 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>.

12. Вершинин А. В., Ерасов И. А., Левшунов Л. С., Янкович А. В. Влияние неравномерности скорости резания мерзлого грунта подкочной машины на энергоёмкость его разрушения // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 6.; URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16611> (дата обращения: 18.03.2022).

13. Семкин Д. С. О влиянии скорости рабочих органов землеройных машин на силу сопротивления грунта резанию // *Вестник СибАДИ*. 2017. № 1 (53). С. 37–43.

14. 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).

15. 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).

16. 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. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-vneshnih-usloviy-iznashivaniya-na-iznosostoykost-reztssov-dorozhnoy-frezy/viewer> (дата обращения: 24.03.2020).

17. 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).

18. 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. Vliyaniye neravnomernosti skorosti rezaniya merzlogo grunta podkopochnoj mashiny na energoemkost' ego razrusheniya [The influence of the uneven cutting speed of the frozen soil of the digging machine on the energy intensity of its destruction] *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014; 6. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22877306>. (assessed: 16.12.2020).

2. Nikolayev V. A. Approximate calculation of the circular soil cutting capacity. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(3):228–240. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-228-240>

3. Bilgin N., Demirkan M. A., Kopur H. The dominant properties of rocks affecting the performance of conical

picks, and a comparison of some experimental and theoretical results. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006; 1(43): 139-156. (In Russ.) URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160905000572?via%3Dihub>. (Accessed: 03/20/2020).

4. Mostafavi S. S. The influence of the angle of attack on the performance of a pickaxe in linear cutting of rocks // 45th U.S. Symposium on Mining Mechanics. *Geomechanics*. 2011. URL: <https://www.researchgate.net/publication/287323602>. (accessed: 03/20/2020).

5. Peng-yu M., Yong-biao H., Xin-rong Z. The study of the adaptive parameter of the power control of a cold milling machine. *Practice and theory of simulation modeling*. 2008; 9(16): 1136-1144. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1569190X08001184?via%3Dihub>. (accessed: 03/20/2020).

6. Kabashev R. A., Turgumbaev S. J. Experimental research of the process of digging soil rotary-disk working bodies under hydrostatic pressure. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016; 4(50): 23-28. (In Russ.)

7. Berestov E. I., Kutynko R. I. Eksperimental'nye issledovaniya rezaniya grunta [Experimental studies of soil cutting. Bulletin of the Belarusian-Russian University]. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2009; 1 (22): 92-100. (In Russ.)

8. Baratashvili M. P. Opredelenie vliyayushih faktorov na rezhimy raboty mashiny i ih znachenie dli arazrusheniya poverhnostnykh sloev asfal'tobetonnykh pokrytij [Determination of influencing factors on the operating modes of the machine and their significance for the destruction of surface layers of asphalt concrete coatings]. *Nauchnyyelektronnyj arhiv*. URL: <http://econfr.ae.ru/article/6606>. (In Russ.) (assessed: 10.01.2020).

9. Wang H. Bin, Hu Yu.B., Lu P.Z. Calculation model and test correction of the resistance force to milling asphalt concrete with one tool. *Zhongguo Gonglu Xuebao. Chinese Journal of Highways and Transport*. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/306182889>. (accessed: 10.01.2020).

10. Liu S.S., Li D.G. Mathematical model of cutting force based on experimental conditions of single cutting. *Meitanxuebao. Journal of the Chinese Coal Society*. 2011. URL: <https://www.researchgate.net/publication/286723599>. (Date of reference: 10.01.2020).

11. Nikolayev V. A. Analysis of the cyclical ground cutting. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019; 16(6): 642-657. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657>

12. Vershinin A.V., Erasov I.A., Levshunov L.S., Jankovich A.V. Vliyanie neravnomernosti skorosti rezaniya miorzlogo grunta podkopchnoj mashiny na jenergojomkost' ego razrusheniya [The influence of uneven cutting speed of frozen soil of a digging machine on the energy intensity of its destruction]. *Sovremennye problem nauki ob razovanija*. 2014; 6.

(in Russ.) URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16611> (accessed: 18.03.2022).

13. Semkin D. S. About influence of speed working bodies of digging machines on the resistance force of soil cutting. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; 1(53): 37-43. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1\(53\)-37-43](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-37-43)

14. Hu Yu.B., Ma P.Yu., Zhang H.R. Modeling and simulation of a cold milling machine // Changandaxuesuebao (Zirankexue Ban). *Journal of Chang'an University (Natural Sciences publication)*. 2008. URL: <https://www.researchgate.net/publication/298243176>. (accessed: 01/13/2020).

15. Wang X., Hu Y. Numerical calculation of resistance to multi-tool milling of a milling machine for asphalt concrete pavement. Xi-An Chao Tong Ta Xue. *Journal of Xi'an Jiaotong University*. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/публикация/306193701>. (Publication date: 13.01.2020).

16. Popov S. N., Antonjuk D. A. Issledovanie vlijaniya vneshnih uslovij iznashivaniya na iznosostojkost' rezcov dorozhnoj frezy [Investigation of the influence of external wear conditions on the wear resistance of road milling cutters]. *Novimateriali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*. 2008. No 1. pp. 25-29. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-vneshnih-usloviy-iznashivaniya-na-iznosostojkost-reztsov-dorozhnoy-frezy/viewer>. (accessed: 24.03.2020).

17. Hekimoglu O. Z. Proposed methods of optimal rotational motion of point-type drawing tools in terms of tilt angles. *International Journal of Mining, Land Reclamation and the Environment*. 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/336811965>. (accessed: 13.01.2020).

18. Park J. Y. Investigation of the efficiency of rock cutting and structural stability of a point-attack milling cutter using laboratory tests of a linear cutting machine 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 Д. В. Организация работы авторского коллектива, формирование направления и формулирование проблемы исследования, постановка задач и методики проведения исследования, разработка и создание испытательного стенда, корректирование материала статьи.

Лысаков Н. Э. Обзор предшествующих исследований, разработка и создание испытательного стенда, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка материала для статьи.

Шамахов Л. М. Разработка и создание испытательного стенда, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Denis V. Furmanov. The organization of the work of the author's team, the formation of the direction and formulation of the research problem, the formulation of tasks and methods of research, the development and creation of a test bench, the correction of the material of the article.

Nikita E. Lysakov. Review of previous studies, development and creation of a test bench, preparation and conduct of experimental studies, processing of the data obtained, preparation of material for the article.

Leonid M. Shamakhov. The development and creation of a test bench, preparation and conduct of experimental studies, processing of the data obtained.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фурманов Денис Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные и дорожные машины».

Лысаков Никита Эдуардович – аспирант кафедры «Строительные и дорожные машины».

Шамахов Леонид Михайлович – студент кафедры «Строительные и дорожные машины».

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Denis V. Furmanov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Construction and Road Machinery Department.

Nikita E. Lysakov – Postgraduate Student of the Construction and Road Machines Department.

Leonid M. Shamakhov – Student of the Construction and Road Machines Department.