

Научная статья
УДК685.089.1
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-190-201>
EDN: WANFVV



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НАЛЕДИ С ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Д.И. Трошин, Л.М. Шамахов ✉, Н.Э. Лысаков, Д.А. Гончаренко, Д.М. Камнев
Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия

✉ ответственный автор
leonid.shamakhov@yandex.ru,

АННОТАЦИЯ

Введение. Для обеспечения безопасности и эффективной очистки автомобильных дорог и тротуаров от снега и наледи в зимний период нужно использовать специальное оборудование. Но еще на этапе создания такого оборудования конструкторам необходимо знать, какие нагрузки будут возникать на рабочем оборудовании в процессе его эксплуатации. Поэтому для разработки фрезерных рабочих органов для снятия наледи с дорожных покрытий следует провести экспериментальное исследование с целью определить нагрузки, возникающие на его рабочем органе.

Материалы и методы. Основной целью экспериментального исследования является определение силы сопротивления резанию, которая возникает на режущем элементе фрезерного рабочего оборудования в процессе его применения при уборке наледи и снега на автомобильных дорогах и тротуарах. Для реализации эксперимента выбран маятниковый стенд, позволяющий исследовать воздействие отдельного режущего элемента фрезы на лед.

Результаты. Полученные результаты дают возможность для прогнозирования изменения нагрузок на фрезерном рабочем органе в процессе эксплуатации. Это позволяет разрабатывать усовершенствованные конструкции дорожно-фрезерного оборудования и модернизировать уже существующие. Применение данных зависимостей также позволяет определить необходимую прочность конструкции фрезерного барабана для нормальной работы оборудования и выбрать рациональное сечение режущих элементов.

Обсуждение и заключение. По результатам проведенных экспериментальных работ были получены зависимости силы сопротивления резанию льда в зависимости от толщины срезаемого слоя, вида льда (чистый; смесь льда, песка и уплотненного снега с примесями; смесь, замороженная слоями; замороженная во льде тротуарная плитка и образец асфальтобетона) и его температуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экспериментальные исследования, лед, процесс фрезерования, сила сопротивления резанию, стенд маятникового типа, снятие наледи, режущий элемент, дорожно-фрезерное оборудование

Статья поступила в редакцию 20.11.2023; одобрена после рецензирования 10.01.2024; принята к публикации 22.04.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Трошин Д.И., Шамахов Л.М., Лысаков Н.Э., Гончаренко Д.А., Камнев Д.М. Экспериментальное определение сил, возникающих в процессе фрезерования наледи с дорожных покрытий // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2. С. 190-201. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-190-201>

© Трошин Д.И., Шамахов Л.М., Лысаков Н.Э., Гончаренко Д.А., Камнев Д.М., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-190-201>

EDN: WAHFVV

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FORCES ARISING IN PROCESS OF MILLING ICE FROM ROAD SURFACES

Denis I. Troshin, Leonid M. Shamakhov ✉, Nikita E. Lysakov,
Danila A. Goncharenko, Daniel M. Kamnev
Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia
✉ corresponding author
leonid.shamakhov@yandex.ru,

ABSTRACT

Introduction. To ensure the safety and effective cleaning of highways and sidewalks from snow and ice in winter, it is necessary to use special equipment. But even at the stage of creating such equipment, designers need to know what loads will occur on the working equipment during its operation. Therefore, in order to develop milling working bodies for removing ice from road surfaces, it is necessary to conduct an experimental study in order to determine the loads arising on its working body.

Materials and methods. The main purpose of the experimental study is to determine the cutting resistance force that occurs on the cutting element of milling working equipment during its application when cleaning ice and snow on highways and sidewalks. To implement the experiment, a pendulum stand was selected, which allows to study the effect of a separate cutting element of a milling cutter on ice.

Results. The results obtained make it possible to predict changes in loads on the milling working body during operation. This makes it possible to develop more advanced designs of road milling equipment and modernize existing ones. The use of these dependencies also enables to determine the necessary structural strength of the milling drum for the normal operation of the equipment and to choose a rational section of the cutting elements.

Discussion and conclusions. According to the results of the experimental work carried out, the dependences of the ice cutting resistance depending on the thickness of the cut layer, the type of ice (pure, a mixture of ice, sand and compacted snow with impurities, a mixture of frozen layers, frozen paving slabs and a sample of asphalt concrete) and its temperature were obtained.

KEYWORDS: experimental studies, ice, milling process, cutting resistance force, pendulum-type stand, ice removal, cutting element, road-milling equipment

The article was submitted 20.11.2023; approved after reviewing 10.01.2024; accepted for publication 22.04.2024.

The author has read and approved the final manuscript.

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

For citation. Troshin D.I., Shamakhov L.M., Lysakov N.E., Goncharenko D.A., Kamnev D.M. Experimental determination of forces arising in process of milling ice from road surfaces. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (2): 190-201. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-190-201>

© Troshin D.I., Shamakhov L.M., Lysakov N.E., Goncharenko D.A., Kamnev D.M., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Фрезерование наледи с дорог является важной профилактической мерой для обеспечения безопасности и улучшения условий дорожного движения в зимние месяцы. Наледь на автомобильной дороге может значительно ухудшить сцепление между шинами автомобиля и дорожным покрытием, увеличивая риск потери управления. Очищенные от наледи дороги способствуют повышению комфорта и безопасности для водителей, пассажиров и пешеходов в зимние периоды.

Удаление наледи с дорог может выполняться механическими и химическими методами. Основным преимуществом использования механических методов над химическими методами обработки дорог и тротуаров является эффективное удаление толстых слоев льда. Механическое оборудование способно обрабатывать большие участки дорог, в то время как применение химического метода удаления наледи разбрасыванием соли и песка лишь помогает предотвратить образование льда. Соль может быть коррозионно активной и вредной для окружающей среды, а песок создает пыль и засоряет территорию, прилегающую к дороге. Химические реагенты могут быть вредны как для окружающей среды, так и для здоровья человека и требуют особой осторожности при применении и хранении.

Выбор механического метода удаления наледи с покрытий автомобильных дорог зависит от конкретных условий, доступной техники и целей удаления наледи. Фрезерование обычно применяется для более интенсивной и точной очистки дорожного покрытия и может быть более эффективным при удалении толстых слоев льда, не разрушая при этом асфальтобетонное покрытие. С другой стороны, методы с применением ковшей, отвалов или ножей могут эксплуатироваться с различной дорожной техникой и тем самым быть более универсальными, но они могут быть менее подходящими для удаления толстой наледи и портить покрытие автомобильных дорог и тротуаров.

Определение нагрузок, возникающих в процессе фрезерования наледи с дорожных покрытий, позволит прогнозировать нагрузки, действующие на фрезерный рабочий орган во время фрезерования наледи. Полученные значения сил позволят учитывать их при разработке и модернизации дорожно-фрезерного оборудования. Это поможет создавать более прочные и эффективные конструкции,

способные справиться с возникающими нагрузками.

Определив значения сил, возникающих в процессе фрезерования наледи с дорожного полотна, возможно рационально подобрать такие параметры фрезерования, как скорость подачи и глубину фрезерования. В свою очередь это позволит снизить износ режущих элементов и энергозатраты, а также достичь более эффективного удаления наледи.

Статья С.Х. Галеева и др. [1] направлена на выбор схемы работы машины для удаления снежно-ледяного покрова. Авторы провели проверочный расчет потребляемой мощности фрезерного оборудования для скалывания снежно-ледяного слоя, работающего по схеме попутного фрезерования. К сожалению, авторы не раскрывают методику определения потребляемой мощности оборудования, где особый интерес представляет определение усилия при работе одного резца. Также авторы никак не рассматривают зависимость мощности при работе оборудования с различной глубиной фрезерования наледи.

В работе [2] по исследованию процесса удаления ледяных образований с поверхности дорожных покрытий авторами предлагается использовать роторы молоткового типа со свободно подвешенными молотками. В ходе испытаний была установлена эффективность оборудования подобного типа при скорости удара молотков от 30 до 50 м/с. Однако при использовании такого оборудования происходит разрушение асфальтобетонного покрытия, что является существенным недостатком предложенного метода удаления снежно-ледяных образований с дорожных покрытий.

Методика разрушения ледяного покрытия на автомобильных дорогах рабочим органом ударного действия представлена в работе [3]. В статье приведен анализ работы рабочего органа льдоскалывающего устройства и выполнен расчет ключевых параметров, влияющих на эффективность работы. В результате исследований была разработана математическая модель, описывающая взаимодействие рабочего органа ударного действия со льдом и снежно-ледяным образованием на дорожной поверхности. В рамках данной работы не хватает результатов исследования взаимодействия рабочего органа с различными типами ледяных образований. Впрочем, выполненная работа обладает высокой практической ценностью и безусловно дополняет общую методологическую базу исследований процесса фрезерования наледи с дорожных покрытий.

Н.С. Галдин и И.А. Семенова в своей работе¹ предлагают использовать льдоскалывающее оборудование на основе гидроударников. Авторы дают заключение, что применение гидроударной или гидроимпульсной технологии в снегоуборочном оборудовании приведет к увеличению производительности снегоуборочных машин и, следовательно, к повышению эффективности зимнего содержания автомобильных дорог. Но сразу возникает вопрос о том, что будет с асфальтобетонным или плиточным покрытием автомобильных дорог и тротуаров. Все же работа является перспективной и требует дополнительных исследований.

В работе [4] по исследованию влияния хода машины планировщика и числа оборотов фрезы на силу резания снежно-ледовой массы тороса рассматривается вопрос удаления торосов с ледового покрова. Авторы представляют новое техническое решение для удаления торосов и исследуют воздействие скорости и глубины резания смерзшегося снежно-ледового массива на силу резания единичным режущим элементом. Получена зависимость силы резания от хода ледорезной машины и количеством оборотов шнековой фрезы с диаметром 1 м. Полученные авторами зависимости сил резания от хода машины позволяют определить нагрузку на элементы фрезы и необходимую мощность для ее работы. Использование теории разрыва снежно-ледовых масс² при оптимальном расположении режущих элементов позволило авторам определить ширину кромки резца и тем самым снизить энергоемкость процесса резания.

Вместе с тем ученые разработали модель шнековой фрезы для очистки ледового покрова водоемов от торосов [5]. Авторами описываются температурные условия, при которых происходит процесс резания снежно-ледяного массива тороса. Приводится описание переменного состава и неравномерной структуры торосов в области их образования. Произведены расчеты основных параметров шнековой фрезы для очистки ледяной поверхности от торосов. Исследован процесс резания льда клинообразными резцами. Определена производительность фрезы, затраты энергии на

очистку и оптимальный наклон полушнеков по отношению к направлению движения режущей машины. Конечно, в этих работах не рассматривается процесс удаления наледи с дорожных покрытий, однако ценность работ с точки зрения изучения процесса резания ледяных образований трудно отрицать.

Авторы работы [6] разработали модель механического фрезерного оборудования для снятия наледи. Анализ результатов исследования показал, что требуемая мощность для привода оборудования в большей степени зависит от скорости подачи и радиуса режущего рабочего органа. Также ученые указывают на то, что комбинация данного оборудования и устройства для термического удаления льда позволит обеспечить дополнительное преимущество.

Математическая модель устройства для очистки дорожных покрытий от наледи предложена в работе [7]. Автор предлагает вариант комбинированной принципиальной схемы устройства для очистки дорожных покрытий от наледи. Описывает принцип работы конструкции с регулируемым генератором колебаний. Также были составлены конструктивная схема и математическая модель динамического взаимодействия колебательного контура и транспортного средства. Эффективность разработанного устройства определяется повышением производительности и качества очистки дорог от наледи.

В [8] описано моделирование процесса и экспериментальная проверка условий разрушения ледяного покрова автомобильных дорог. В работе представлен анализ работоспособности рабочего органа ледорезной машины, оборудованного сферическими ударниками. Представлен расчет и моделирование основных параметров, характеризующих эффективность работы методом конечных элементов. А также приводится сравнение экспериментальных данных, полученных в ходе проведения испытаний рабочего органа ударного действия с результатами компьютерного моделирования динамического проникновения шара в ледяную поверхность асфальтобетонного дорожного покрытия. Относительная погрешность при сравнении эксперименталь-

¹ Галдин Н.С., Семенова И.А. Льдоскалывающее оборудование на основе гидроударников // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Омск, 29–30 ноября 2018 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. С. 57–61. EDN VSZKKK.

² Зенков Р.А. Механика насыпных грузов. М.: Машиностроение, 1964. 246 с.

ных данных и данных, полученных при моделировании составила 5–12%.

Анализ процесса работы вибровозбудителей повышенной эффективности для ледокольных, строительных и дорожных машин представлен в работе [9]. Авторы отражают математические и графические зависимости, характеризующие рабочий процесс этих вибровозбудителей, подтверждающие их эффективность. Асимметричный вибровозбудитель может использоваться в приводах рабочих органов ледокольных машин для создания направленного воздействия движущей силы. Это позволяет увеличить величину импульса при воздействии в определенном направлении и повысить эффективность работы машин.

Статья [10] посвящена разработке конструкции навесного, ударно-роторного рабочего оборудования для разрушения снежно-ледяных образований. Вместе с тем разработана механико-математическая модель устройства для скалывания льда, позволяющая оптимизировать конструкцию ледокольной машины с целью повышения эффективности путем регулирования и выбора ее рациональных механических и геометрических характеристик.

Выявление основных закономерностей эксплуатации фрезерных и роторных снегоочистителей отражено в [11]. Авторы провели экспериментальные исследования, в результате которых был определен характер образования снежного покрова и получены уравнения регрессии для распределения количества частиц. С помощью полученных зависимостей можно моделировать и визуализировать формирование сугробов при уборке снега, выбирать наиболее эффективные параметры машин для уборки снега, а также улучшать стратегию проведения работ по уборке снега с использованием определенных типов снегоочистителей.

А.В. Лысянников, Р.Б. Зелькевич и др.³ провели анализ режущих инструментов, применяемых для разрушения снежно-ледяных образований на дорожном покрытии. Учеными

были выявлены основные параметры, учитываемые при создании рабочего оборудования, а именно влияние скорости резания на долговечность режущего инструмента и усилие резания, оптимальные углы резания и расположение инструмента. Вместе с тем авторы представили основные преимущества использования дисковых фрез, которые позволят заменить трение скольжения режущей кромки традиционным трением качения зуба. По мнению авторов, в результате увеличивается срок службы инструмента, снижаются динамические нагрузки на рабочий орган при встрече с включениями, так как контакт режущей кромки с включениями в начальный момент будет точечным, а скорость будет уменьшаться по мере погружения в массив, следовательно, нагрузка на режущий инструмент будет медленно увеличиваться.

В работе⁴ приведена оценка влияния скорости резания на удельные энергозатраты процесса разрушения льда острым диском. Ученые рассматривают возможность повышения эффективности рабочего навесного оборудования дорожных машин. Ими представлены основные результаты исследований процессов взаимодействия пильного полотна, движущегося в пространстве с переменной скоростью, со льдом при его механическом разрушении. С учетом этих результатов была рассчитана удельная энергоемкость исследуемого процесса и дано обоснование рациональных рабочих параметров пильных полотен, обеспечивающих минимальные удельные энергозатраты исследуемого процесса.

Проведенный анализ существующих работ показывает, что открытым остается вопрос исследования процесса взаимодействия режущих элементов машин для скалывания льда с различными смесями снежно-ледяных образований, а также определение нагрузок, воздействующих на рабочие органы таких машин при их эксплуатации. Поэтому целью настоящей работы будет являться определение силы сопротивления резанию возникающих в

³ Analysis of the cutting tool for the destruction of snow-ice formations on road pavement / A.V. Lysyannikov, R.B. Zelykevich, Yu.N. Bezborodov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Workshop "Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019", Krasnoyarsk, 04–06 апреля 2019 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 537. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. P. 32107. DOI 10.1088/1757-899X/537/3/032107. EDN CBBBQS.

⁴ Impact assessment of cutting velocity on specific energy consumption of ice fracture process with sharp disc / V.A. Ganzha, G.G. Voskresensky, Yu.F. Kaizer [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 25 сентября – 04 октября 2020 года. Vol. 1679. Krasnoyarsk, Russian Federation: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 42054. DOI 10.1088/1742-6596/1679/3/042054. EDN QXVSRB.

процессе фрезерования снежно-ледяных образований с покрытий дорог.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальное исследование заключается в определении влияния вида снежно-ледяной смеси, ее температуры и толщины срезаемой стружки на силу сопротивления резанию. Исследование направлено на решение основных задач конструирования дорожных машин, предназначенных для эффективного удаления наледи с дорожных покрытий.

Изучение рабочего процесса фрезерования наледи, образуемой в зимний период на покрытии автомобильных дорог и тротуарах, начато с исследования взаимодействия единичного режущего элемента с снежно-ледяной смесью. Таким образом, для проведения исследований наиболее подходит стенд с маятниковым рабочим органом⁵. Использование данного метода позволяет оценить энергоемкость процесса резания и определить среднюю касательную составляющую силы резания. Исследование образцов снежно-ледяных смесей на маятниковом стенде позволит выявить энергетические показатели процесса, что в свою очередь позволит определить необходимую мощность привода и усредненные значения нагрузок, возникающих на элементах привода и барабана. Еще одним преимуществом этого оборудования является возможность максимально точной имитации работы режущего элемента в соответствии с функционированием режущего элемента на барабане фрезы. Это получается путем достижения требуемых скоростей резания с использованием реальных режущих элементов. Такие конструкции испытательных стендов успешно применяются для оценки энергетических показателей хрупкого разрушения при испытаниях металлов⁶ и полимеров⁷ для определения ударной вязкости, а также для определения энергоемкости процесса резания природных материалов, таких как древесные

отходы и торф⁸. Вместе с тем существует положительный опыт использования маятника для определения сил сопротивления резанию с применением единичного режущего элемента фрезерной машины [12].

Стенд с маятниковым рабочим органом, изображенный на рисунке 1, представляет собой конструкцию, состоящую из опор 1, жестко закрепленных на фундаменте при помощи дополнительных растяжек 2. На опорах в подшипниках качения размещен маятниковый рычаг 3. Лимб 4 служит для фиксации угла отклонения маятника и определения максимального угла отклонения после удара. Дополнительный регулируемый рычаг 5, служащий для изменения угла входа режущего элемента в материал. На рычаге 5 также расположена площадка 6 для крепления режущего элемента.

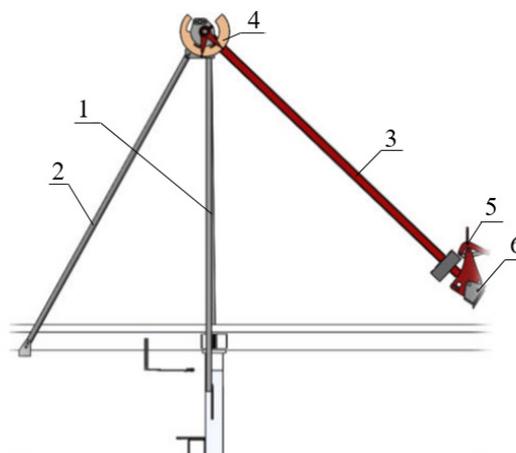


Рисунок 1 – Стенд с маятниковым рабочим органом:
1 – опора; 2 – растяжка; 3 – рычаг; 4 – лимб;
5 – регулируемый рычаг;
6 – площадка для установки режущего элемента
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – A stand with a pendulum working body.
1 – pillar, 2 – stretching, 3 – lever, 4 – limb,
5 – adjustable lever,
6 – platform for the installation of the cutting element
Source: compiled by the authors.

⁵ Шамахов Л.М., Лысаков Н.Э. Особенности использования маятникового стенда для изучения процессов резания дорожно-строительных материалов // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Омск, 10–11 февраля 2022 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. С. 38–42. EDN UQCRIIP.

⁶ ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. Введены с 17.04.78. М.: Издательство стандартов, 1994.

⁷ ГОСТ 4647–2015. Пластмассы. Методы определения ударной вязкости по Шарпи. Введены с 20.11.2015. М.: Стандартинформ, 2017.

⁸ Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи. М.: Недра, 1985. 211 с.

Работа стенда с маятниковым механизмом действует следующим образом: маятниковый рычаг отклоняется на угол α_1 , который устанавливается по шкале лимба и соответствует требуемой скорости при ударе. Сбрасывание рычага маятника, совершающего движение вокруг оси крепления, осуществляется с помощью сбрасывающего механизма. После набора необходимой скорости режущая часть входит в область резания и начинает срезать материал с выставленной заранее толщиной. Затем режущая часть выходит из области резания материала и одновременно усилие передается через систему рычагов на датчик, показания которого обрабатываются тензометрической станцией непосредственно во время рабочего процесса. На основе полученных данных можно определить силу резания во время работы. После того как режущая часть вышла из области резания, маятниковый рычаг продолжает движение, достигает крайней точки и начинает двигаться обратно, а угол α_2 фиксируется на шкале. Таким образом, путем измерения начальных и конечных угловых координат можно определить среднюю работу сил резания.

Концепция работы стенда с маятниковым рабочим органом основана на принципе изменения кинетической энергии, согласно которому изменение кинетической энергии механической системы в процессе ее перемещения равно сумме работ всех приложенных сил, приложенных к точкам системы на перемещение этих точек (1):

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

где K – кинетическая энергия начала процесса резания, Дж;

K_0 – кинетическая энергия при выходе режущего элемента из зоны резания, Дж;

A – работа всех сил, Дж.

Потеря кинетической энергии определяется выполненной работой сил резания и энергетическими потерями в подшипниках качения маятника, величиной которых из-за их незначительности мы можем пренебречь. Кинетическая энергия маятника преобразуется из потенциальной, накопленной до момента внедрения, в материал. После завершения работы сил резания кинетическая энергия снова преобразуется в потенциальную, когда маятник перемещается на определенную высоту. Таким образом, будет справедливо следующее соотношение (2):

$$K = m \cdot g \cdot h, \quad (2)$$

где m – масса ударной части маятника, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

h – высота сбрасывания маятника, мм.

Среднюю величину горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию (3) можно определить на основе измеренного значения, пройденного режущим элементом пути:

$$F_{\text{ср}} = \frac{A}{S}, \quad (3)$$

где S – путь, пройденный режущим элементом, мм.

При планировании эксперимента за исходные данные приняты следующие параметры:

- в качестве образцов снежно-ледяных смесей были выбраны смесь с чистым льдом (рисунок 2, а), смесь льда, песка и уплотненного снега с примесями (собрана с проезжей части автомобильной дороги с последующей заморозкой, рисунок 2, б), смесь льда, песка и уплотненного снега, замороженная ориентировочно с равными размерами слоев (рисунок 2, в), замороженная во льде тротуарная плитка (рисунок 2, г) и образец асфальтобетона (рисунок 2, д) при толщине льда сверху дорожного покрытия порядка 20–30 мм. Предварительно образцы были залиты в специально подготовленные формы и заморожены в холодильной камере, что позволяет максимально воссоздать снежно-ледяные образования на поверхностях автодорог и тротуаров;

- за режущий элемент взят прут круглого сечения длиной 120 мм изготовленного из пружинной стали и установленные под углом 20° к установочной площадке (рисунок 3);

- скорость резания на момент входа режущего элемента в испытуемый материал соответствует 2 м/с. Такое значение приближено к скоростным показателям существующих устройств для фрезерования снежно-ледяных образований.

В качестве независимых параметров выбраны следующие показатели:

- температура образцов снежно-ледяных образований при проведении испытаний составляла от -10 до -25 °С, при средней температуре воздуха в лаборатории 10 °С. Выбранный интервал варьирования температуры соответствует интервалу температур в зимний период в центральной части Российской Федерации;

- интервал варьирования толщины снимаемой стружки за один проход режущего элемента составлял от 10 до 30 мм. Такой интервал был выбран исходя из конструктивных особенностей маятникового стенда и рациональных параметров процесса фрезерования снежно-ледяных образований.

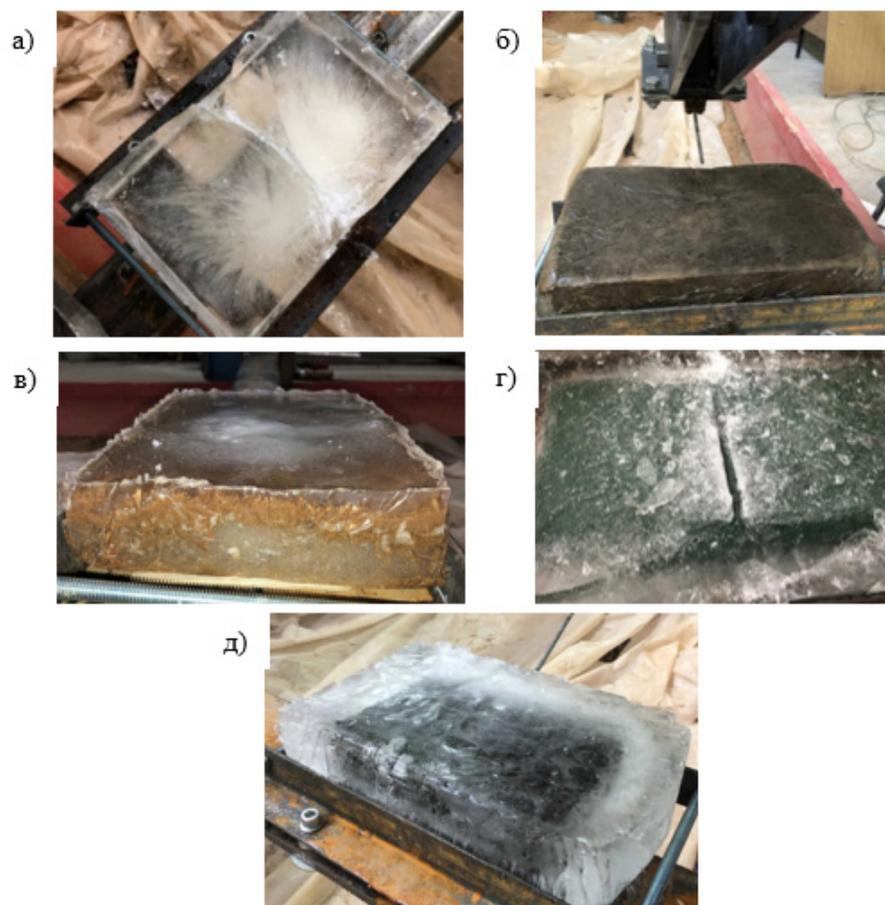


Рисунок 2 – Испытуемые образцы снежно-ледяных образований:
 а – лед в чистом виде; б – смесь льда, песка и уплотненного снега с примесями;
 в – смесь льда, песка и уплотненного снега с примесями, замороженная слоями;
 г – замороженная во льде тротуарная плитка; д – замороженный во льде образец асфальтобетона
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Test samples of snow and ice formations:
 a – pure ice, b – a mixture of ice, sand and compacted snow with impurities,
 c – a mixture of ice, sand and compacted snow with impurities frozen in layers,
 d – frozen paving slabs in ice, e – frozen asphalt concrete sample in ice
 Source: compiled by the authors.



Рисунок 3 – Режущий элемент на установочной площадке
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Cutting element on the installation site
 Source: compiled by the authors.

Таблица
Результаты исследования сил сопротивления резанию в зависимости от толщины срезаемой стружки, типа снежно-ледяной смеси и ее температуры
 Источник: составлено авторами.

Table
Study results of cutting resistance forces depending on the thickness of the chip being cut, the type of snow-ice mixture and its temperature
 Source: compiled by the authors.

Тип снежно-ледяной смеси	Значение сил сопротивления резанию, Н	Значение достоверности аппроксимации, R ²
Лед, замороженный в чистом виде	$F = -0,19 \cdot (7,11 + t) \cdot h^{1,82}$	0,986
Смесь льда, песка и уплотненного снега с примесями	$F = -2,07 \cdot (4,09 + t) \cdot h^{1,16}$	0,976
Смесь льда, песка и уплотненного снега с примесями замороженного слоями	$F = -7,16 \cdot (-5,83 + t) \cdot h^{7,45}$	0,944
Лед, намороженный на строительно-дорожный материал	$F = -20,17 \cdot (1,38 + t) \cdot h^{9,43}$	0,922

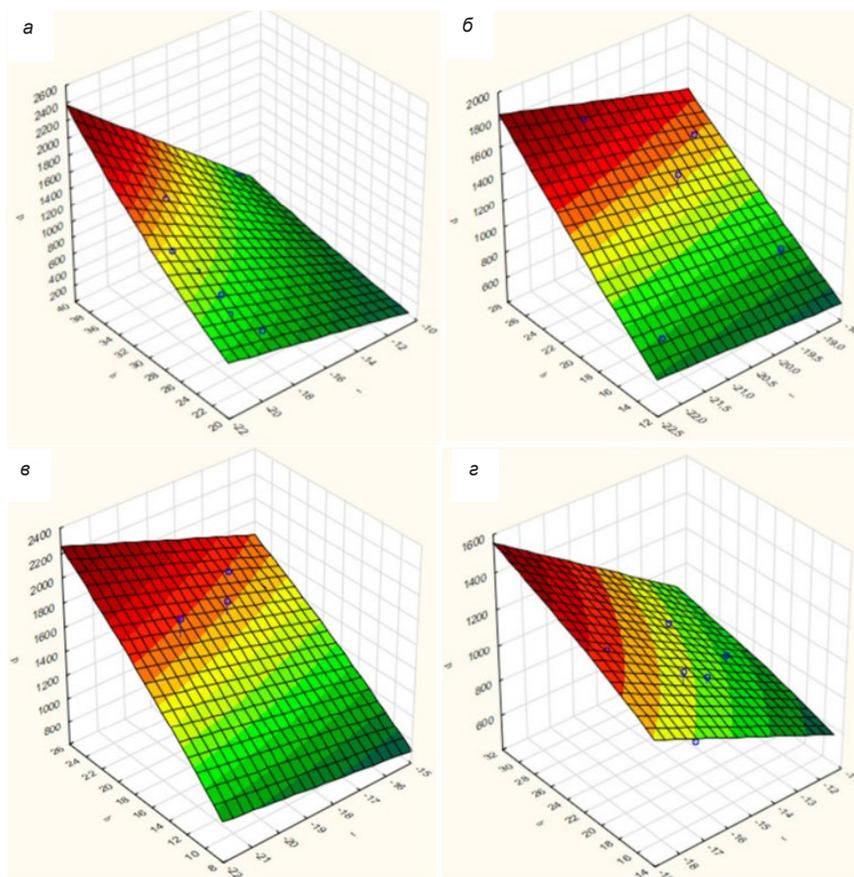


Рисунок 4 – Графики зависимости сил сопротивления резанию от толщины срезаемой стружки и температуры для:
 а – льда в чистом виде; б – смеси льда, песка и уплотненного снега с примесями;
 в – смеси льда, песка и уплотненного снега с примесями замороженного слоями;
 г – замороженного во льде тротуарной плитки и образца асфальтобетона
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Graphs of the dependence of the cutting resistance forces on the thickness of the chips being cut and temperature for:
 a – pure ice, b – a mixture of ice, sand and compacted snow with impurities
 c – a mixture of ice, sand and compacted snow with impurities frozen in layers,
 d – frozen paving slabs and asphalt concrete sample.
 Source: compiled by the authors.

На основе предоставленных данных было осуществлено исследование, в результате которого выявлена основная зависимость, а также сделаны соответствующие выводы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе результатов проведенного исследования получены необходимые данные, которые позволили построить графики зависимости силы сопротивления резанию от толщины срезаемой стружки, типа снежно-ледяной смеси и ее температуры (рисунок 4). Также были выявлены основные нагрузки, возникающие на режущем элементе в процессе эксплуатации такого оборудования. Уравнения регрессии, полученные на основе этих графиков, представлены в таблице. По каждому типу снежно-ледяного образования было проведено по меньшей мере 7–10 опытов при толщине снимаемой стружки от 10 до 30 мм. На рисунке 4 из-за особенностей программы при построении трехмерного графика, некоторые точки не отображаются, так как их скрывает полученная поверхность.

По результатам работы можно сделать несколько выводов:

– Полученные данные позволяют прогнозировать возникающие нагрузки на режущем элементе в процессе эксплуатации машин для скалывания льда с дорожных покрытий методом фрезерования. А следовательно, эти данные можно использовать и для определения производительности и энергоемкости процесса фрезерования снежно-ледяных образований.

– Вместе с тем удалось рассмотреть характер изменения нагрузок при фрезеровании различных типов снежно-ледяных смесей. Так, для смеси льда, песка и уплотненного снега с примесями замороженного слоями максимальное значение силы сопротивления резанию, равное 1800 Н достигается при глубине 24 мм, по сравнению со льдом в чистом виде, который достигает такого же значения силы при глубине в 36 мм. Из этого следует, что различные добавки и материалы создают дополнительный армирующий эффект и повышают общую прочность наледи.

– Полученные зависимости в таблице позволяют определять нагрузку, действующую на рабочее оборудование в зависимости от выборного типа снежно-ледяного образования и температуры, а также глубины фрезерования. Результаты дают возможность для построения математической модели фрезеро-

вания наледи с дорожных покрытий и последующей оптимизации этого процесса.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований позволяют нам выявлять зависимости между силой сопротивления резанию и такими факторами как: тип снежно-ледяной смеси и ее температура, а также толщины срезаемой стружки. Кроме того, мы можем сделать вывод о необходимости учитывать дополнительную прочность снежно-ледяных образований с учетом ее дополнительных армирующих материалов еще на стадии проектирования новых фрезерных машин для скалывания наледи с дорожных покрытий.

Для дополнения методики расчета параметров требуется внесение дополнительных коэффициентов, учитывающих влияние различных видов режущих элементов в процессе эксплуатации машины. Решение этой задачи необходимо будет достичь через проведение дополнительных исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Галеев С.Х., Муртазин Р.Ш., Белавин М.В. Выбор схемы работы машины для удаления снежно-ледяного покрова // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая. 2021. № 9. С. 27–31. EDN OWOPTЕ.
2. Эралиев Н.Д., Новиков М.О., Фурманов Д.В. Исследование процесса удаления ледяных образований с поверхности дорожных покрытий // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2014. Т. 1. С. 553–555. EDN SJJGRZ.
3. Дудкин М.В., Фадеев С.Н., Пичугин С.Ю. Методика разрушения ледяного покрытия на автомобильных дорогах рабочим органом ударного действия // Новости науки Казахстана. 2015. № 3(125). С. 177–191. EDN UUQZPU.
4. Исследование влияния хода машины планировщика и числа оборотов фрезы на силу резания снежно-ледовой массы тороса / И.С. Никандров, А.Л. Малыгин, А.Д. Шурашов, Ю.В. Краснов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 3(138). С. 98–105. DOI 10.46960/1816-210X_2022_3_98. EDN CYOAPD.
5. Разработка модели шнековой фрезы для очистки ледового покрова водоемов от торосов / И.С. Никандров, А.Л. Малыгин, А.Д. Шурашов, А.А. Середкин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 1(140). С. 117–124. DOI 10.46960/1816-210X_2023_1_117. EDN OZVNPQ.
6. Zhu Z. C. et al. R&D of Mechanical-milling Deicing Equipment Cutting Model and Power Calculation // Advanced Materials Research. 2013. Т. 753. pp. 1576–1581.

7. Gavrilin, A.N. Development of a Mathematical Model of a Device for Cleaning Road Surfaces from Ice / A.N. Gavrilin // *Material and Mechanical Engineering Technology*. 2021. Vol. 2, No. 2. P. 16–22. DOI 10.52209/2706-977X_2021_2_16. – EDN KYUREK.

8. Process modeling and experimental verification of the conditions of ice coverage destruction of automobile roads / M. Doudkin, A. Kim, G. Guryanov [et al.] // *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*. 2019. Vol. 42, No. 4. – P. 1–8. – DOI 10.26480/jmerd.04.2019.01.08. EDN EKUKNT.

9. Analysis of vibroexciters working process of the improved efficiency for ice breaking, construction and road machines / A. Kim, M. Doudkin, M. Sakimov [et al.] // *Journal of Vibroengineering*. 2020. Vol. 22, No. 3. P. 465–485. DOI 10.21595/jve.2020.20446. – EDN TOTASL.

10. Development of mounted impact-rotor working equipment for destruction of snow-ice formations / A. Kim, G. Guryanov, A. Vavilov [et al.] // *International Review of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 15, No. 5. P. 258–267. DOI 10.15866/ireme.v15i5.20805. EDN KYFPVT.

11. Experimental investigations of snow bank formation during milling and rotary snow blower operation / D.S. Aleshkov, M.V. Sukovin, M.V. Banket [et al.] // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. Vol. 19, No. 1. P. 9–16. DOI 10.5937/jaes0-28018. EDNNQECCA.

12. 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>

REFERENCES

1. Galeev S.H., Murtazin R.S., Belavin M.V. Vybór shemy raboty mashiny dlja udalenija snezhno-ledjanogo pokrova [The choice of the operation scheme of a machine for removing snow and ice cover]. *Trudy Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: Tehnologicheskaja*. 2021; 9: 27–31. (in Russ.) EDN OWOPTÉ.

2. Eraliev N.D., Novikov M.O., Furmanov D.V. Issledovanie processa udalenija ledjanyh obrazovanij s poverhnosti dorozhnyh pokrytij [Investigation of the process of removing ice formations from the surface of road surfaces]. *Modernizacija i nauchnye issledovanija v transportnom komplekse*. 2014; Vol. 1: 553–555. (in Russ.) EDN SJJGRZ.

3. Dudkin M.V., Fadeev S.N., Pichugin S.Y. Metodika razrushenija ledjanogo pokrytija na avtomobil'nyh dorogah rabochim organom udarnogo dejstvija [The method of destruction of ice coating on highways by a working body of impact action]. *Novosti nauki Kazahstana*. 2015; 3(125):177–191. (in Russ.) EDN UUQZPU.

4. Nikandrov I.S., Malygin A.L., Shurashov A.D., Krasnov Yu.V. Issledovanie vlijanija hoda mashiny planirovshhika i chisla oborotov frezy na silu rezanija snezhno-ledovoj massy torosa [Investigation of the

influence of the stroke of the planner machine and the number of turns of the cutter on the cutting force of the snow-ice mass of the hummock]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2022; 3(138): 98–105. (in Russ.) DOI 10.46960/1816-210X_2022_3_98. EDN CYOAPD.

5. Nikandrov I.S., Malygin A.L., Shurashov A.D., Seredkin A.A. Razrabotka modeli shnekovoj frezy dlja ochistki ledovogo pokrova vodoemov ot torosov [Development of a model of a screw cutter for cleaning the ice cover of reservoirs from hummocks]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2023; 1(140):117–124. (in Russ.) DOI 10.46960/1816-210X_2023_1_117. EDN OZVNPQ.

6. Zhu Z.C. et al. R&D of Mechanical-milling Deicing Equipment Cutting Model and Power Calculation. *Advanced Materials Research*. 2013; Vol. 753:1576–1581.

7. Gavrilin A.N. Development of a Mathematical Model of a Device for Cleaning Road Surfaces from Ice. *Material and Mechanical Engineering Technology*. 2021. Vol. 2, No. 2. P. 16–22. DOI 10.52209/2706-977X_2021_2_16. EDN KYUREK.

8. Process modeling and experimental verification of the conditions of ice coverage destruction of automobile roads. M. Doudkin, A. Kim, G. Guryanov [et al.] *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*. 2019; Vol. 42, No. 4: 1–8. DOI 10.26480/jmerd.04.2019.01.08. – EDN EKUKNT.

9. Analysis of vibroexciters working process of the improved efficiency for ice breaking, construction and road machines. A. Kim, M. Doudkin, M. Sakimov [et al.] *Journal of Vibroengineering*. 2020; Vol. 22, No. 3: 465–485. DOI 10.21595/jve.2020.20446. EDN TOTASL.

10. Development of mounted impact-rotor working equipment for destruction of snow-ice formations. A. Kim, G. Guryanov, A. Vavilov [et al.]. *International Review of Mechanical Engineering*. 2021; Vol. 15, No. 5: 258–267. DOI 10.15866/ireme.v15i5.20805. EDN KYFPVT.

11. Experimental investigations of snow bank formation during milling and rotary snow blower operation. D.S. Aleshkov, M.V. Sukovin, M.V. Banket [et al.]. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021; Vol. 19, No. 1: 9–16. DOI 10.5937/jaes0-28018. EDN NQECCA.

12. 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. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-196-207>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Трошин Д.И. Организация работы авторского коллектива, формирование направления и формулирование проблемы исследования, постановка задач и методики проведения исследования, корректирование материала статьи.

Шамахов Л.М. Обзор предшествующих исследований, разработка и создание испытательного

стенда, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка материала для статьи.

Лысаков Н.Э. Разработка и создание испытательного стенда, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных.

Гончаренко Д.А. Подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных.

Камнев Д.М. Подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Denis I. Troshin. Author's team work management, direction and research problem statement, tasks and research methods of statement, article correction.

Leonid M. Shomakhov. Previous studies review, development and creation of a test bench, preparation and conduct of experimental studies, processing of the data obtained, preparation of material for the article.

Nikita E. Lysakov. Development and creation of a test bench, preparation and conduct of experimental studies, processing of the data obtained.

Danila A. Goncharenko. Preparation and conduct of experimental studies, processing of the obtained data.

Daniil M. Kamnev. Preparation and conduct of experimental studies, obtained data processing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трошин Денис Игоревич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88.), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0875-6331>, **SPIN-код:** 4937-4674, e-mail: denistroshin1@rambler.ru

Шамахов Леонид Михайлович – ассистент кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88.), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7559-282X>, **SPIN-код:** 9115-7950, e-mail: leonid.shamakhov@yandex.ru

Лысаков Никита Эдуардович – ассистент кафедры «Строительные и дорожные машины»

Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88.), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6646-7947>, **SPIN-код:** 5721-4601, e-mail: nik.lysakov.1997@mail.ru

Гончаренко Данила Алексеевич – студент кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88.), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-2879-3962>, e-mail: goncharenko.danila03@bk.ru

Камнев Даниил Михайлович – студент кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88.), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-4968-7177>, e-mail: kam14dan14@gmail.com

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Denis I. Troshin – Cand. of Sci., Associate Professor of the Construction and Road Machinery Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0875-6331>, **SPIN-код:** 4937-4674, e-mail: denistroshin1@rambler.ru

Leonid M. Shamakhov – Assistant of the Construction and Road Machinery Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7559-282X>, **SPIN-код:** 9115-7950, e-mail: leonid.shamakhov@yandex.ru

Nikita E. Lysakov – Assistant of the Construction and Road Machinery Department Yaroslavl State Technical University (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6646-7947>, **SPIN-код:** 5721-4601, e-mail: nik.lysakov.1997@mail.ru

Danila A. Goncharenko – Student of the Construction and Road Machinery Department Yaroslavl State Technical University (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-2879-3962>, e-mail: goncharenko.danila03@bk.ru

Daniil M. Kamnev – Student of the Construction and Road Machinery Department Yaroslavl State Technical University (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-4968-7177>, e-mail: kam14dan14@gmail.com