УДК 621.87.001.24:625.768.5 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-19-23

# Методика обработки экспериментальных данных при контроле нагрузочных параметров разрушения снежно-ледяных образований дисковым режущим инструментом

А.С. Сатышев[a], Ю.Н. Безбородов[b], В.А. Ганжа[c]

Институт нефти и газа Сибирского федерального университета, пр. Свободный 82, Красноярск, Россия
[a]satushev@gmail.com, [b]ybezborodov@sfu-kras.ru, [c]vladimirganzha@yandex.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-0647-8502, [b]https://orcid.org/0000-0003-2489-3985
[c]https://orcid.org/0000-0002-6393-2361
Статья поступила 2.06.2018, принята 7.07.2018

*В статье предложен способ повышения достоверности данных, полученных при контроле нагрузочных параметров разрушения снежно-ледяных образований дисковым режущим инструментом, за счет их обработки в программе MATLAB. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности использования ресурсной базы Арктической зоны, заложенной в госпрограмме «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года». Речь идет, в частности, о разработке новых рабочих органов специальных машин аэродромно-технического обеспечения, выполненных на базе дискового режущего инструмента. Представлены результаты обработки экспериментальных данных, полученных в ходе исследования силы сопротивления резанию, возникающей в ходе разрушения снежно-ледяных образований дисковым инструментом. Получены графические зависимости переходных процессов резания льда дисковым инструментом с различным радиусом закругления рабочей кромки и различным шагом резания. Проанализированы полученные зависимости, и сделаны выводы о корректности результатов эксперимента. Получены данные для дальнейшего анализа и разработки методики расчета силы сопротивления резанию прочных снежно-ледяных образований (ПСЛО) на ранних этапах проектирования, учитывающей влияние радиуса закругления рабочей кромки дискового режущего инструмента и шага резания. Работа является продолжением серии экспериментальных лабораторных исследований процессов взаимодействия дискового режущего инструмента и ПСЛО, проводимых в течении ряда лет в Сибирском федеральном университете.*

**Ключевые слова:** снежно-ледяные образования; прочные снежно-ледяные образования; дисковый режущий инструмент; силовые параметры; лед; радиус закругления рабочей кромки.

# Methodology for processing experimental data when controlling the loading parameters of the destruction of snow-ice formations by a disk cutting tool

A.S. Satyshev[a], Yu.N. Bezborodov[b], V.A. Ganzha[c]

School of Petroleum and Natural Gas Engineering of Siberian Federal University; 82, Svobodny Ave., Krasnoyarsk, Russia
[a]satushev@gmail.com, [b]ybezborodov@sfu-kras.ru, [c]vladimirganzha@yandex.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-0647-8502, [b]https://orcid.org/0000-0003-2489-3985
[c]https://orcid.org/0000-0002-6393-2361
Received 2.06.2018, accepted 7.07.2018

*The article suggests a method for increasing the reliability of data obtained by monitoring the load parameters of the destruction of snow-ice formations by a disk cutting tool, due to their processing in the MatLAB program. The relevance of the study is due to the need to increase the efficiency of the use of the resource base of the Arctic zone, laid down in the state program "Socio-economic development of the Arctic zone of the Russian Federation for the period until 2020". It is, in particular, the development of new working bodies of special machines for aerodrome and technical support, made on the basis of a disk cutting tool. The results of the processing of experimental data obtained during the investigation of the cutting resistance force arising during the destruction of snow-ice formations by a disk tool are presented. Graphical dependences of the transient processes of ice cutting with a disk tool with different radius of the rounding of the working edge and different cutting steps are obtained. The obtained dependences are analyzed and conclusions are made about the correctness of experimental results. Data have been obtained for further analysis and development of a technique for calculating the strength of the resistance to cutting of persistent snow-ice formations (PSIF) in the early stages of design, taking into account the effect of the radius of curvature of the working edge of the disk cutting tool and the cutting step. The work is a continuation of a series of works on experimental laboratory studies of the processes of interaction of disk cutting tools with PSIFs, held during a number of years at the Siberian Federal University.*

**Key words:** snow-ice formations; persistent snow-ice formations; disk cutting tools; force parameters; ice; radius of curvature of the working edge.

**Введение**

Для выполнения программы «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года», утвержденной постановлением правительства [1], необходимо реализовать стратегию [2], согласно которой предусмотрена интеграция Арктической зоны с основными районами России посредством освоения и разработки месторождений углеводородов, цветных и драгоценных металлов, формирования современных транспортно-логистических узлов и опорной сети автомобильных дорог, развития, реконструкции и модернизации сети аэропортов.

Это повлечет за собой необходимость содержания вновь построенных и реконструированных автомобильных дорог и аэродромов в зимний период, длительность которого в некоторых северных районах превышает 140 дней в году. Самые сложные и ответственные мероприятия по содержанию дорожных покрытий различного назначения направлены на разрушение и удаление снежно-ледяных образований (СЛО). Известны несколько способов борьбы со СЛО: химико-механический, фрикционный, тепловой, механический. Последний способ позволяет разрушать и удалять СЛО с дорожных покрытий, не нанося вреда окружающей среде, а также экономить на химических реагентах, топливе, сохранять целостность дорожного полотна. Это закрепляет за механическим способом первенство в разработке и проектировании новых рабочих органов дорожных машин.

Однако существует ниша, в которой данный способ является малоэффективным, а именно удаление прочных снежно-ледяных образований (ПСЛО). Это обусловлено их физико-механическими свойствами: плотность $\rho = 0{,}6 \div 0{,}9$ г/см$^3$; предел прочности на сжатие $\sigma = 2{,}5 \div 2{,}8$ МПа; толщина слоя $h \le 100$ мм; температура исследуемой среды $-2 \div -10$ $^{\circ}C$. Существующие рабочие органы или не приспособлены для их разрушения, или делают это с низкой эффективностью. Для повышения эффективности и снижения энергоемкости при удалении ПСЛО предложено применение дискового режущего инструмента [3–5]. Однако с применением дискового режущего инструмента встает вопрос создания высокоэффективных рабочих органов. На стадии их проектирования необходимо знать силовые параметры, величина которых зависит от множества факторов, таких как скорость резания, геометрические параметры инструмента, температура окружающей среды и разрушаемого материала, степень износа, обусловленная радиусом закругления рабочей кромки.

*Цель работы:* выявление зависимости силовых параметров, а именно силы сопротивления резанию ПСЛО от таких факторов, как радиус закругления рабочей кромки дискового режущего инструмента и шаг резания.

Для более объективного изучения процесса взаимодействия дискового инструмента с ПСЛО предлагается контролировать три составляющие силы резания: горизонтальную, боковую и вертикальную. Контроль этих составляющих непосредственно на рабочем органе малоэффективен, так как требует больших трудозатрат и дорогостоящего оборудования (датчики силы, оснастка для их монтажа), невозможно изолировать взаимовлияние температуры окружающей среды, влажности, теплозапаса дорожного полотна и других факторов, постоянно меняются физико-механические свойства ПСЛО (прочность, плотность, наличие абразивного материала). Поэтому, опираясь на результаты работ по резанию мерзлых грунтов различными инструментами [6–9], целесообразно исследовать процесс взаимодействия полноразмерного дискового режущего инструмента с различным радиусом закругления рабочей кромки и разрушаемого массива путем стендовых испытаний в лабораторных условиях.

В качестве режущего инструмента принят заостренный дисковый резец, изображенный на рис. 1. При проведении экспериментальных исследований использовались дисковые резцы с различным радиусом закругления рабочей кромки $R = [0{,}5; 1{,}5; 2{,}5; 3{,}5; 4{,}5]$ мм. Данный диапазон значений обусловлен результатами исследований изнашивания режущей кромки, проведенными в работе [7]. Остальные параметры дискового режущего инструмента приняты следующими: диаметр $D = 200$ мм, угол заострения $\delta = 30°$, глубина резания $h = 60$ мм, шаг резания $t = [10; 20; 30; 40; 50]$ мм, задний угол $\gamma = 3 \div 5°$, температура окружающего воздуха $-2 \div -7$ $^{\circ}C$, скорость резания 0,51 м/с (1,84 км/ч).

Для проведения эксперимента использовался механизированный лабораторный стенд, описанный в работе [10] и защищенный патентом на изобретение № 2429459 [11]. Для фиксирования, сбора и записи информации применен измерительный комплекс, описанный в статье [12].

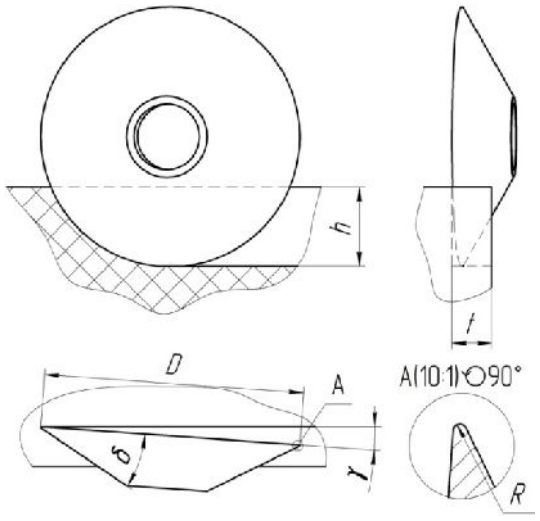


**Рис. 1.** Схема взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемым массивом: *t* — шаг резания; *D* — диаметр дискового резца; δ — угол заострения; *h* — глубина резания; γ — задний угол

**Обработка результатов эксперимента.** После проведения экспериментальных лабораторных исследований, выявления влияния радиуса закругления рабочей кромки дискового инструмента и шага резания на составляющие силы, возникающей при механическом разрушении льда, получен набор файлов с записью значений напряжений, снятых с АЦП. Каждый файл соответствует своему сочетанию исследуемых параметров *R* и *t*. Структура файла приведена на рис. 2.

Для дальнейшего использования полученных данных предлагается произвести обработку и оценку их корректности методами математики и статистики, такими как отброс грубых ошибок, фильтрация, сглаживание, отброс постоянной составляющей, усреднение значений повторных экспериментов.

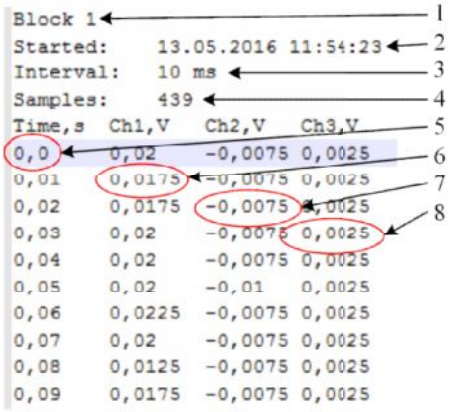


**Рис. 2.** Пример структуры файла хранения данных: 1 — название блока данных; 2 — дата и время начала измерений; 3 — интервал между измерениями в миллисекундах; 4 — количество сохраненных измерений; 5 — отсчет времени в секундах; 6, 7, 8 — значения напряжения на чувствительном элементе в вольтах для 1–3-го каналов соответственно

**Алгоритм отброса грубых ошибок.** Для повышения точности оценки переходного процесса и снижения влияния всевозможных внешних факторов целесообразно применить к полученному набору точек (сигналу) алгоритм отброса грубых ошибок [13]. Суть алгоритма заключается в использовании метода максимального относительного отклонения:

$$\tau = \frac{\left|x_i - \overline{x}\right|}{\sigma_x}, \qquad (1)$$

где $x_i$ — крайний (наибольший или наименьший) элемент сигнала; $\overline{x}$ — среднее значение сигнала; $\sigma_x$ — среднеквадратическое отклонение (СКО) сигнала.

Сравнивая $\tau$ с критическим значением $\tau_{(p,\ n)}$, рассчитанным по (2), можно сделать вывод, является ли наблюдение грубой погрешностью или нет:

$$\tau_{(p,n)} = \frac{t_{(p,n-2)} \cdot \sqrt{n-1}}{\sqrt{n-2+\left|t_{(p,n-2)}\right|^2}}, \qquad (2)$$

где $t_{(p,\ n-2)}$ — критическое значение распределения Стьюдента при доверительной вероятности $q = 1 - p$; $n$ — количество наблюдений в сигнале переходного процесса.

Таким образом, мы имеем алгоритм отброса грубых ошибок, представленный на рис. 3. Есть смысл ввести три группы наблюдений, удовлетворяющих следующим условиям: $\tau \le \tau_{(5\%,\ n)}$ — нельзя отсеивать; $\tau_{(5\%,\ n)} < \tau < \tau_{(0{,}1\%,\ n)}$ — можно отсеять, если в пользу этой процедуры имеются и другие соображения; $\tau > \tau_{(0{,}1\%,\ n)}$ — отсеиваются всегда. Приведем объяснение работы каждого блока в вербальном виде:

1. Из наблюдаемых значений выбирается максимальное и минимальное значения сигнала по модулю, далее значения сравниваются, и выбирается наибольшее.

2. Рассчитывается $\tau$ по формуле (1).

3. Вычисляются критические точки $\tau_{(0{,}1\%,\ n)}$ и $\tau_{(5\%,\ n)}$ по формуле (2).

4. Проверяется условие $\tau > \tau_{(0{,}1\%,\ n)}$, если выполняется — переходим к п. 5, иначе — к п. 6.

5. Исключаем наблюдение из массива точек и переходим к п. 1.

6. Проверяем условие $\tau \le \tau_{(5\%,\ n)}$, если оно выполняется — переходим к п. 9, иначе — к п. 7.

7. Анализируем другие факторы, способные указать на допущение грубой ошибки.

8. Принимаем решение, отбрасывать или нет. Если отбрасываем, переходим к п. 5, иначе — к п. 9.

9. Выход из алгоритма. Оставшиеся наблюдения, и есть полезный сигнал.

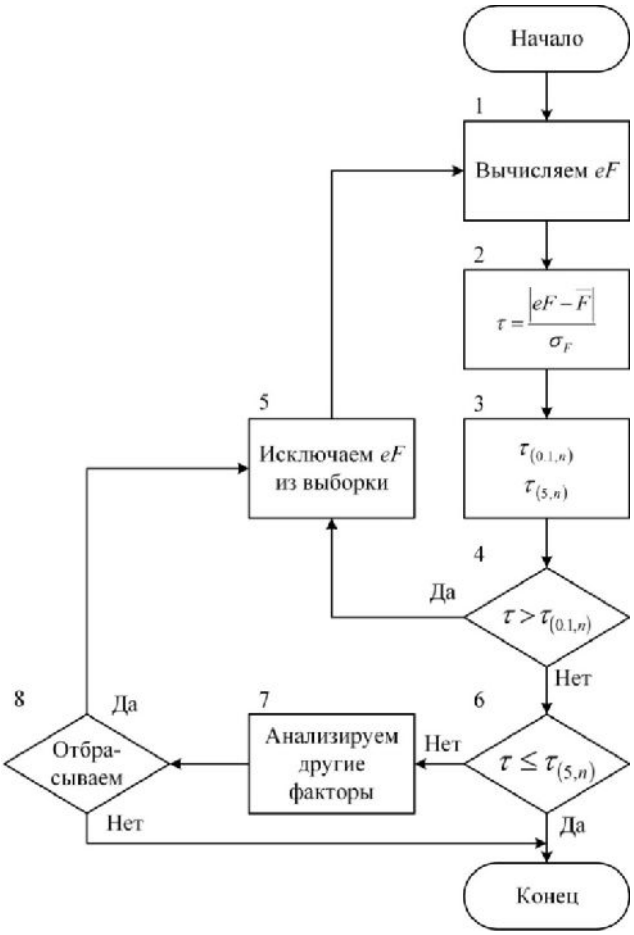


**Рис. 3.** Алгоритм отброса грубых ошибок

**Сглаживание сигнала.** Для более наглядной читаемости и устранения влияния высокочастотных помех предлагается применение цифрового фильтра «Скользящая средняя». Этот способ является наиболее простым в реализации и дает хорошие результаты при правильном подборе апертуры. Скользящее среднее (*moving average MA*) вычисляется по формуле:

$$MA_t = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1}\left(b_i \cdot p_{t-i}\right), \qquad (3)$$

где $MA_t$ — значение скользящего среднего в точке $t$; $n$ — количество значений исходной функции для расчета скользящего среднего (апертура); $p_{t-i}$ — значение исходной функции в точке $t$ — $i$; $b_i$ — вектор весовых коэффициентов.

Обычно для фильтров скользящего среднего применяется равномерное распределение весов. Например, если $n$ = 4, то $b = \left[\frac{1}{4} \quad \frac{1}{4} \quad \frac{1}{4} \quad \frac{1}{4}\right]$. Такой фильтр будет называться простым скользящим средним (*simple moving average SMA*). В данной работе предлагается выбирать весовые коэффициенты для МА путем оценки автокорреляционной функции от исследуемого сигнала. На рис. 4 построена автокорреляционная функция, ее доверительные интервалы [−0.09623 0.09623]. Предлагается за весовые коэффициенты взять первые значения до пересечения с «верхней» доверительной границы. Такой алгоритм обусловлен включением в окно скользящего среднего только «тесно» связанных между собой значений целевой функции и в то же время применяет веса к включенным значениям согласно их влиянию.

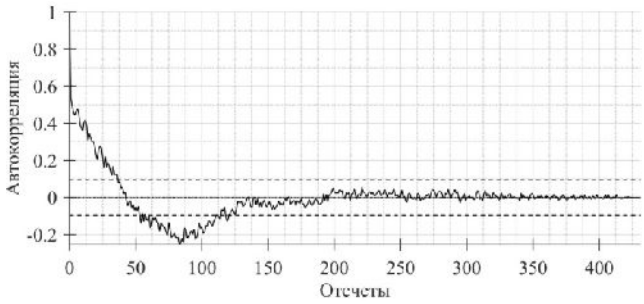


**Рис. 4.** Автокорреляционная функция с доверительным интервалом

**Заключение**

Анализируя работу описанных алгоритмов, на рис. 5 можно видеть отброшенные пиковые выбросы сигнала 2, рассчитанные с помощью алгоритма отброса грубых ошибок. Такие выбросы могут свидетельствовать о кратковременных скачках напряжения в питающей сети, обусловленных работой силового оборудования, такого как трехфазный двигатель привода лабораторного стенда, холодильная установка.

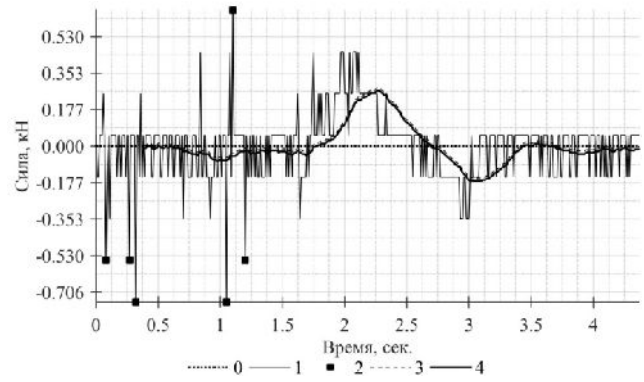


**Рис. 5.** Переходный процесс разрушения льда: 1 — сигнал, полученный с АЦП «сырой»; 2 —точки, отброшенные в результате работы алгоритма отброса грубых ошибок; 3 — результат скользящего среднего; 4 — результат отброса постоянной составляющей

Также на графике представлен сглаженный сигнал переходного процесса резания льда 3, полученный путем применения алгоритма скользящего среднего с адаптивным окном сглаживания. Как видно, график 3 имеет некоторое смещение по временной оси, которое обусловлено размером окна сглаживания. Смещение не является критичным, так как расположено в начале временной оси, в тот момент времени, когда происходит движение резца в свободном состоянии (до момента внедрения в ледяной массив). Также на графике 3 явно видны отрицательные значения сигнала. Отрицательные значения на временном промежутке от 0,375 до 1,75 с объясняются наличием упругих элементов в тензометрическом звене и не нулевыми моментами инерции кронштейна и дискового режущего инструмента. Отрицательные значения на промежутке времени с 2,75 по 3,5 с имеют тот же характер, однако обусловлены резкой остановкой тензометрической головки вместе с оснасткой и инструментом.

График 4 мало отличается от графика 3, однако это сигнал, имеющий нулевую постоянную составляющую. Столь малые отличия объясняются хорошей подстройкой переменного резистора в мостовой схеме включения тензометрических резисторов. Однако такая подстройка нередко может производиться неточно или вообще не производиться. Поэтому для получения результирующего сигнала используется алгоритм отброса постоянной составляющей, а именно перевод сигнала в частотную область и вычисление амплитуды нулевой частоты.

Таким образом, полученные данные становятся более читаемыми и пригодными к дальнейшему анализу, который подразумевает построение математической модели взаимодействия дискового режущего инструмента с ПСЛО, учитывающей такие параметры, как радиус закругления рабочей кромки и шаг резания.

*Литература*

1. Об утверждении государственной программы Российской Федерации “Социально экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года”: постановление Правительства Рос. Федерации от 21апр. 2014 г. № 366 (ред. от 17.12.2014). М., 2015. 36 с.

2. Стратегия развития арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года, утв. Президентом Рос. Федерации от 8 февр. 2013г. Пр232. М., 2013. 11 с.

3. Ганжа В.А. Дисковый режущий инструмент для разрушения снежно-ледяных образований // Наука и техника в дорожной отрасли. 2012. № 2. 37 с.

4. Ганжа В.А. Разрушение прочных снежно-ледяных образований // Наука и техника в дорожной отрасли. 2015. № 3. С. 21-25.

5. Рабочий орган для удаления снежно-ледяного наката с поверхности дорог и аэродромов: пат. 2487970 Рос. Федерация. № 2012109412/13; заявл. 10.03.12; опубл. 20.07.13, Бюл. № 20.

6. Желукевич Р.Б.Разработка мерзлых грунтов землеройными машинами с дисковым инструментом: моногр. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 196 с.

7. Барон Л.И.Разрушение горных пород проходческими комбайнами: Разрушение тангенциальными инструментами. М.: Наука, 1973. 172 с.

8. Барон Л.И., Глатман Л.Б., Загорский С.Л. Разрушение горных пород проходческими комбайнами: Разрушение шарошками. М.: Наука, 1969. 146 с.

9. Зеленин А.Н., Карасев Г.Н., Красильников Л.В. М.: Высш. школа, 1969. 310 с.

10. Шрам В.Г. Модернизация стенда для испытания режущего инструмента рабочих органов строительных и дорожных машин // Вестн. Куз. гос. техн. ун-та. 2013. № 3. С. 14-17.

11. Ганжа В.А., Желукевич Р.Б., Безбородов Ю.Н. Стенд для испытания рабочих органов землеройных машин: пат.2429459 Рос. Федерация № 2010116560/28; заявл. 26.04.10; опубл. 20.09.11, Бюл. № 26.

12. Сатышев А.С. Измерительный комплекс для контроля силы сопротивления снежно ледяных образований резанию дисковым инструментом // Измерение, контроль, информатизация: материалы XVII междунар. науч.-технической конф. Барнаул, 2016. С. 155-158.

13. Львовский Е Н. Статистические методы построения эмпирических формул: М.: Высш. шк., 1988. 239 с.

*References*

1. Ob utverzhdenii gosudarstvennoj programmy Rossijskoj Federacii “Social and economic development of the Arctic zone of the Russian Federation until 2020”: postanovlenie Pravitel’stva Ros. Federaciiot 21apr. 2014 g. № 366 (red. ot 17.12.2014). M., 2015. 36p.

2. Strategy of development of the Arctic zone of the Russian Federation and national security for the period up to 2020, utv. Prezidentom Ros. Federacii ot 8 fevr. 2013g. Pr232. M., 2013. 11 p.

3. Ganzha V.A. The disk blade for destruction of snow-ice formation // Science and Engineering for Highways. 2012. № 2. P. 37.

4. Ganzha V.A. Breaking the strong snowand ice formations// Science and Engineering for Highways. 2015. № 3. P. 21-25.

5. Working body to remove snow and ice from the surface of roads and airfields: pat. 2487970 Ros. Federaciya. № 2012109412/13; zayavl. 10.03.12; opubl. 20.07.13, Byul. № 20.

6. Zhelukevich R.B. Development of frozen soils with earth-moving machines with a disk tool: monogr. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2012. 196 p.

7. Baron L.I. Destruction of rocks by tunneling combines: destruction by tangential tools. M.: Nauka, 1973. 172 p.

8. Baron L.I., Glatman L.B., Zagorskij S.L. Destruction of rocks by tunneling combines: Destruction by cutters. M.: Nauka, 1969. 146 p.

9. Zelenin A.N., Karasev G.N., Krasil’nikov L.V. M.: Vyssh. shkola, 1969. 310 s.

10. Shram V.G. Stand modernization for the test of cutting tools working bodies of construction and road machines // Vestnik of Kuzbass State Technical University. 2013. № 3. P. 14-17.

11. Ganzha V.A., Zhelukevich R.B., Bezborodov Yu.N. Stand for testing of working bodies of digging machines: pat. 2429459 Ros. Federaciya № 2010116560/28; zayavl. 26.04.10; opubl. 20.09.11, Byul. № 26.

12. Satyshev A.S. Measuring complex for controlling the force of resistance of snow-ice formations by cutting a disk tool // Izmerenie, kontrol’, informatizaciya: materialy XVII mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj konf. Barnaul, 2016. P. 155-158.

13. L’vovskij E N. Statistical methods for constructing empirical formulas: Ucheb.posobie dlya VTUZov. 2-e izd. M. :Vyssh. shk., 1988. 239 s.