

# МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ КОНТРОЛЕ НАГРУЗОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ДИСКОВЫМ РЕЖУЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ

## METHODS FOR PROCESSING EXPERIMENTAL DATA WHEN CONTROLLING THE LOADING PARAMETERS OF THE DESTRUCTION OF SNOW-ICE FORMATIONS BY A DISK CUTTING TOOL

Сатышев Антон Сергеевич, старший преподаватель, [satushev@gmail.com](mailto:satushev@gmail.com)<sup>1</sup>,  
Ганжа Владимир Александрович, канд. техн. наук, доцент, [vladimirganzha@yandex.ru](mailto:vladimirganzha@yandex.ru)<sup>1</sup>,  
[satushev@gmail.com](mailto:satushev@gmail.com)<sup>2</sup>,  
Ganzha Vladimir Aleksandrovich, Ph.D., dotcent, [vladimirganzha@yandex.ru](mailto:vladimirganzha@yandex.ru)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт нефти и газа «Сибирский Федеральный Университет», 660041, г. Красноярск, Свободный проспект, 82 ст. 6

<sup>2</sup>School of Petroleum and Natural Gas Engineering «Siberian Federal University», 660041, g. Krasnoyarsk, Svobodnyi prospekt, 82 st. 6

### Аннотация

**Актуальность работы.** 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 аэропортовой сети.

Это повлечет за собой необходимость содержания, вновь построенных и реконструированных, автомобильных дорог и аэродромов в зимний период. Длительность которого в некоторых 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 мало эффективным, а именно удаление прочных снежно-ледяных образований (ПСЛО). Это обусловлено их физико-механическими свойствами: плотность  $\rho = 0,6 \div 0,9 \text{ г/см}^3$ ; предел прочности на сжатие  $\sigma = 2,5 \div 2,8 \text{ МПа}$ ; толщина слоя  $h \leq 100 \text{ мм}$ ; температура исследуемой среды  $-2^\circ\text{C} \div -10^\circ\text{C}$ . Существующие рабочие органы или не приспособленные для их разрушения или делают это мало эффективно. 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 проектирования которых необходимо знать силовые параметры, величина которых зависит от множества факторов. Например, таких, как: скорость резания; геометрические параметры инструмента; температура окружающей среды и разрушаемого материала; степени износа, обусловленная радиусом закругления рабочей кромки.

**Цель работы:** выявление зависимости силовых параметров, а именно силы сопротивления резанию прочных снежно-ледяных образований, от таких факторов как радиус закругления рабочей кромки дискового режущего инструмента и шаг резания. Работа является продолжением серии экспериментальных исследований процессов взаимодействия дискового режущего инструмента с ПСЛО, в течении ряда лет, проводимых в Сибирском Федеральном Университете.

**Методы исследования:** При решении поставленной задачи применен комплексный подход, включающий: научный анализ и обобщение опыта проведенных ранее исследований; экспериментальные лабораторные исследования процесса резания льда полноразмерными дисковыми режущими инструментами с различным радиусом закругления рабочей кромки; математическую и статистическую обработку результатов эксперимента.

**Результаты:** Были получены графические зависимости переходных процессов резания льда с различным радиусом закругления рабочей кромки и шагом резания. Проанализированы полученные зависимости и сделаны выводы о корректности проведения эксперимента. А также получены данные для дальнейшего анализа и разработки методики расчета силы сопротивления резанию ПСЛО, на ранних этапах проектирования, учитывающей влияние радиуса закругления рабочей кромки, дискового режущего инструмента и шага резания.

**Ключевые слова:** снежно-ледяные образования, дисковый режущий инструмент, силовые параметры, радиус закругления, лёд, радиус закругления рабочей кромки.

**The urgency of the discussed issue.** To implement the government program «Socio-economic development of the Arctic zone of the Russian Federation for the period until 2020» approved by government decision [1] need to implement the strategy [2]. According to which the integration of the Arctic zone with the main regions of Russia is envisaged through: the exploitation of hydrocarbons, non-ferrous and precious metals; the formation of modern transport-logistics nodes and the core network of roads; development, reconstruction and modernization of the airport network.

This will require the maintenance, newly built and reconstructed roads and airfields during winter. The duration of which in some areas is more than 140 days a year. The most complex and important arrangements for the maintenance of road surfaces, for various purposes, aimed at the destruction of and removal of snow-ice formations (SIF). There are several ways of dealing with the SIF: chemical-mechanical; frictional; heat; mechanical. The latter method allows you to destroy and remove SIF from pavements without causing harm to the environment and to save on chemical reagents, fuel; to maintain the integrity of the roadway. It establishes mechanically the leader in the development and design of new working bodies on road cars.

However, there is a niche in which this method is not very effective, namely the removal of persistent snow-ice formations (PSIF). This is due to their physico-mechanical properties: density  $\rho = 0,6 \div 0,9 \text{ g/sm}^3$ ; the limit of compressive strength  $\sigma = 2,5 \div 2,8 \text{ MPa}$ .; the thickness of the layer  $h \leq 100 \text{ mm}$ .; the temperature of the test medium  $-2^\circ\text{C} \div -10^\circ\text{C}$ . Existing working bodies or are not adapted to their destruction, or make it not effective. To improve performance and reduce energy consumption when you remove PSIF proposed the use of disk cutting tool [3 – 5]. However, with the use of disk cutting tool, the problem of creation of highly effective working bodies, at the design stage need to know about force parameters, the value of which depends on many factors. Such as: cutting speed; the geometrical parameters of the instrument; ambient temperature and destructible material; value of the radius of curvature of the working edge.

**The main aim of the study:** the main aim of the study the dependence of the force parameters, of the resistance to cutting of persistent snow-ice formations, on factors such as

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 experimental studies of the processes of interaction of the disk cutting tool with PSIF, for a few years, held at the Siberian Federal University.

**The methods used in the study:** When solving this problem, an integrated approach is applied, including: scientific analysis and generalization of the experience of previous studies; Experimental laboratory studies of the process of cutting ice with full-sized disk cutting tools with different radius of curvature of the working edge; mathematical and statistical processing of experimental results.

**The results:** Graphical dependences of the transient processes of cutting ice with different radius of the curvature of the working edge and the cutting step. The obtained dependences are analyzed and conclusions are made on the correctness of the experiment. Also, data were obtained for further analysis and development of a technique for calculating the cutting resistance force of the PSIF in the early stages of design, taking into account the influence of the radius of the curvature of the working edge, the disk cutting tool and the cutting step.

**Key words:** snow-ice formations, disk cutting tool, force parameters, PSIF, ice, radius of curvature of the working edge.

## 1 Введение

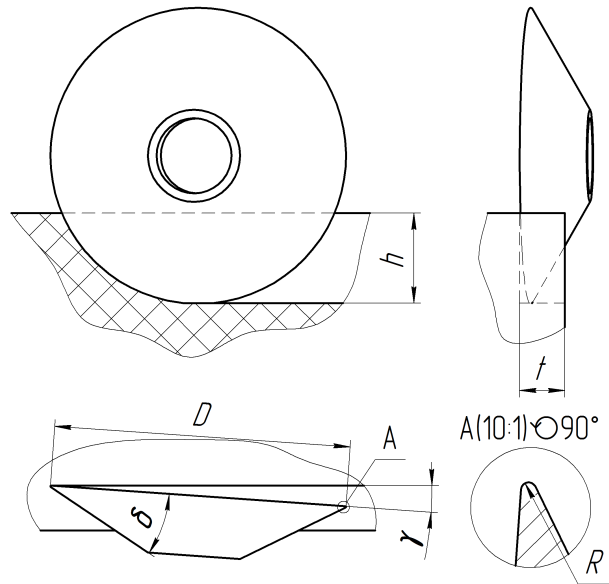
Для более объективного изучения процесса взаимодействия дискового инструмента с ПСЛО предлагается контролировать три составляющие силы резания: горизонтальную, боковую и вертикальную. Контроль этих составляющих непосредственно на рабочем органе мало эффективен, так как: требует больших трудозатрат и дорогостоящего оборудования (датчики силы, оснастка для их монтажа); невозможно изолировать влияние температуры окружающей среды, влажности, теплозапаса дорожного полотна и других факторов друг на друга; 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 с разрушаемым массивом путем стендовых испытаний в лабораторных условиях.

В качестве режущего инструмента принят заостренный дисковый резец изображенный на рисунке 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 исследования изнашивания режущей кромки проведенными в работе [7]. Остальные параметры дискового режущего инструмента приняты следующими: диаметр:  $D = 200$  мм.; угол заострения:  $\delta = 30^\circ$ ; глубина резания:  $h = 60$  мм.; шаг резания:  $t = [10; 20; 30; 40; 50]$  мм.; задний угол:  $\gamma = 3^\circ \div 5^\circ$ ; температура окружающего воздуха:  $-2^\circ C \div -7^\circ C$ ; скорость резания:  $0,51 \text{ м/с}$  ( $1,84 \text{ км/ч}$ ).

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].

## 2 Обработка результатов эксперимента

После проведения экспериментальных лабораторных исследований выявления влияния радиуса закругления рабочей кромки и шага резания на составляющие силы, возникающей на дисковом инструменте, при механическом разрушении льда, получен набор



$t$  — шаг резания;  $D$  — диаметр дискового резца;  $\delta$  — угол заострения;  $h$  — глубина резания;  $\gamma$  — задний угол.

Рис. 1. Схема взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемым массивом

Fig. 1. Scheme of interaction of a disk cutting tool with a destructible array

файлов с записью значений напряжений снятых с АЦП. Каждый файл соответствует своему сочетанию исследуемых параметров  $R$  и  $t$ . структура файла приведена на рисунке 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.

## 2.1 Алгоритм отброса грубых ошибок

Для улучшения 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:

$$\tau = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma_x}, \quad (1)$$

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

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

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

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

Таким образом имеем алгоритм отброса грубых ошибок представленный на рисунке 3. Имеет смысл ввести три группы наблюдений, удовлетворяющих следующим условиям:  $\tau \leq \tau_{(5\%,n)}$  нельзя отсеивать;  $\tau_{(5\%,n)} < \tau < \tau_{(0,1\%,n)}$  можно отсеять, если в пользу этой

Block 1				1
Started:	13.05.2016	11:54:23		2
Interval:	10	ms		3
Samples:	439			4
Time,s	Ch1,V	Ch2,V	Ch3,V	5
0,0	0,02	-0,0075	0,0025	6
0,01	0,0175	-0,0075	0,0025	7
0,02	0,0175	-0,0075	0,0025	8
0,03	0,02	-0,0075	0,0025	
0,04	0,02	-0,0075	0,0025	
0,05	0,02	-0,01	0,0025	
0,06	0,0225	-0,0075	0,0025	
0,07	0,02	-0,0075	0,0025	
0,08	0,0125	-0,0075	0,0025	
0,09	0,0175	-0,0075	0,0025	

1 — Название блока данных; 2 — Дата и время начала измерений; 3 — Интервал между измерениями в миллисекундах; 4 — Количество сохранённых измерений; 5 — Отсчёт времени в секундах; 6, 7, 8 — Значение напряжения на чувствительном элементе в вольтах для первого, второго и третьего канала соответственно.

Рис. 2. Пример структуры файла хранения данных

Fig. 2. Example of the structure of a data storage file

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 значение сигнала по модулю, далее значение 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 пункту 5, иначе к 6.
5. Исключаем наблюдение из массива точек и переходим к пункту 1.
6. Проверяем условие  $\tau \leq \tau_{(5\%, n)}$  если выполняется переходим к пункту 9, иначе к 7.
7. Анализируем другие факторы способные указать на допущение грубой ошибки.
8. Принимаем решение отбрасывать или нет. Если отбрасываем переходим к пункту 5, иначе к 9.
9. Выход из алгоритма. Оставшиеся наблюдения и есть полезный сигнал.

## 2.2 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 даёт хорошие результаты при правильном подборе апертуры. Скользящее среднее (moving average **MA**) вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned}
 MA_t &= b_0 \cdot p_t + b_1 \cdot p_{t-1} + \dots + b_i \cdot p_{t-i} + \dots + b_{n-2} \cdot p_{t-n-2} + b_{n-1} \cdot p_{t-n-1} = \\
 &= \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (b_i \cdot p_{t-i}),
 \end{aligned} \tag{3}$$

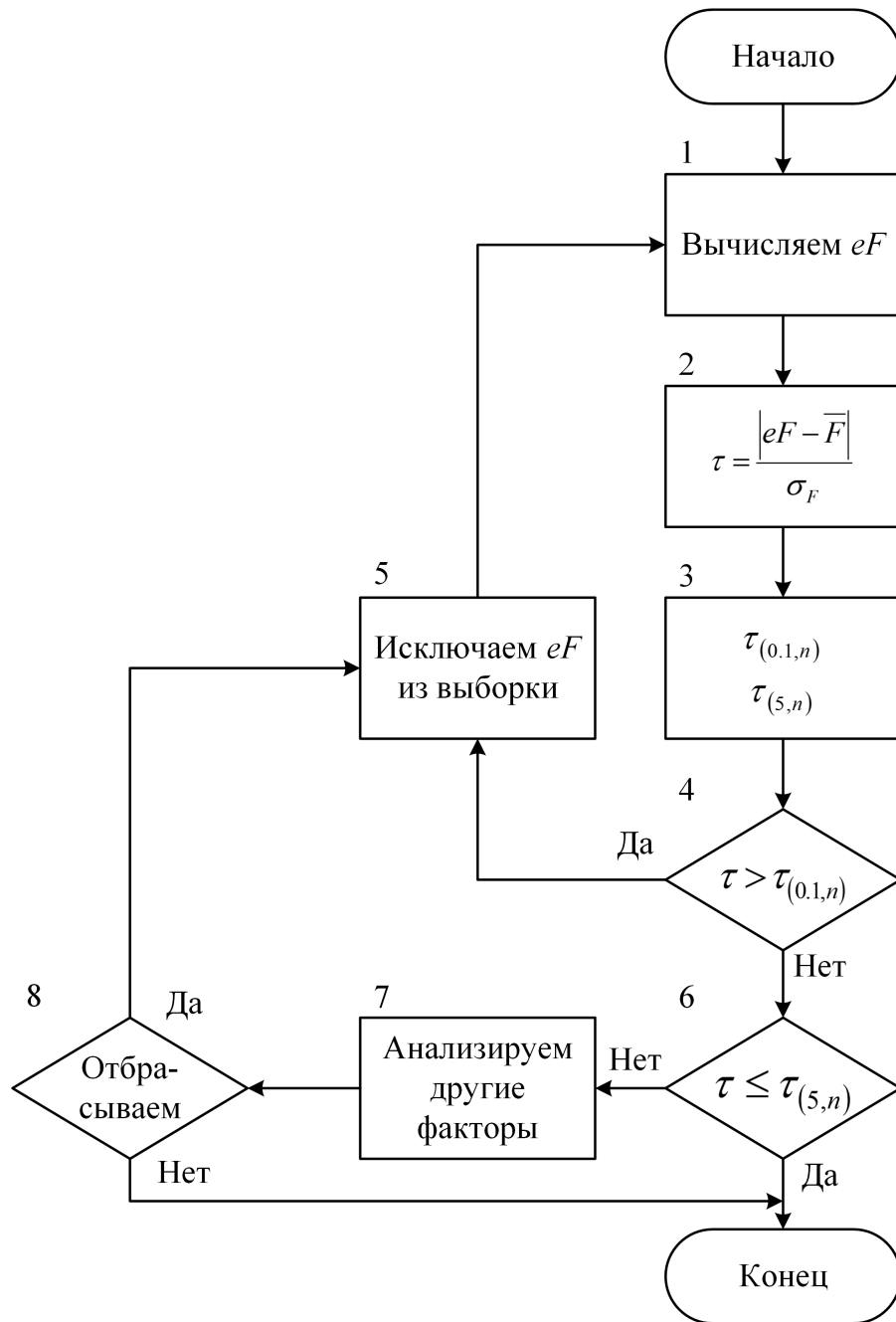


Рис. 3. Алгоритм отброса грубых ошибок  
Fig. 3. Algorithm for drop gross errors

где  $MA_t$  — значение скользящего среднего в точке  $t$ ;  $n$  — количество значений исходной функции для расчёта 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  $b = [\frac{1}{4} \ \frac{1}{4} \ \frac{1}{4} \ \frac{1}{4}]$ . Такой фильтр будет называться простым скользящим средним (simple moving average SMA). В данной работе предлагается выбирать весовые коэффициенты для МА путём оценки автокорреляционной функции от требуемого сигнала. На рисунке 4 построена автокорреляционная функция и ее доверительные интервалы  $[-0.09623 \ 0.09623]$ . Предлагается за весовые коэффициенты взять первые значения автокорреляционной функции, до пересечения её и «верхней» доверительной границы. Такой алгоритм обусловлен включением в окно скользящего среднего



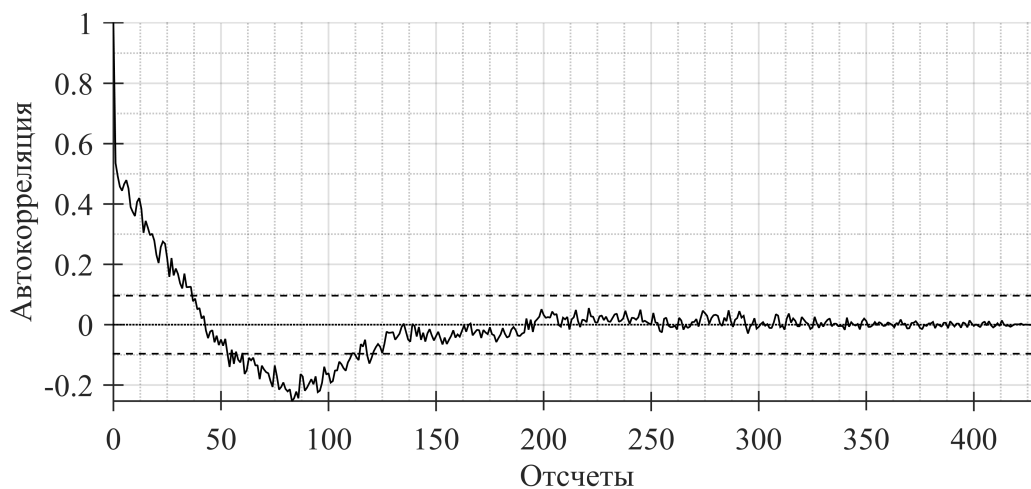
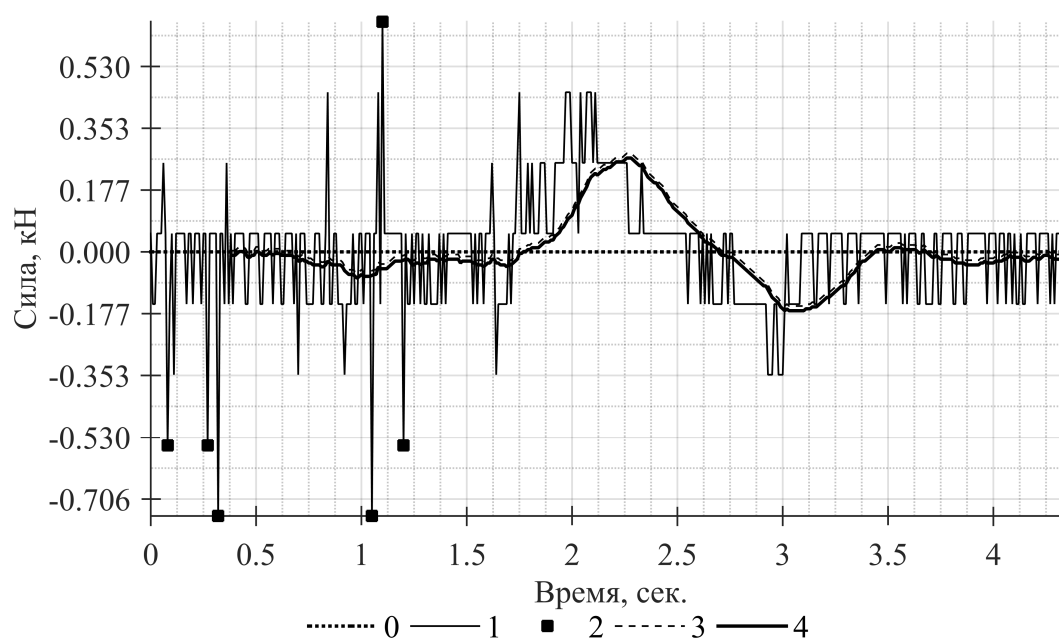


Рис. 4. Автокорреляционная функция с доверительным интервалом  
Fig. 4. Autocorrelation function with confidence interval

только «тесно» связанных между собой значений целевой функции, и в тоже время применяет веса к включённым значениям согласно их влиянию.

### 3 Выводы

Анализируя работу описанных алгоритмов, по рисунку 5 можно видеть отброшенные пиковые выбросы сигнала 2, рассчитанные с помощью алгоритма отброса грубых ошибок. Такие выбросы могут свидетельствовать о кратковременных скачках напряжения



1 — сигнал полученный с АЦП «сырой»; 2 — отброшенные точки в результате работы алгоритма отброса грубых ошибок; 3 — результат скользящего среднего; 4 — результат отброса постоянной составляющей.

Рис. 5. Переходный процесса разрушения льда  
Fig. 5. Transient process of ice breakdown

в питающей сети, обусловленных работой силового оборудования, такого как трехфазный двигатель привода лабораторного стенда, холодильная установка.

Так же 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 свободной состоянии (до момента внедрения в ледяной массив). Так же на графике 3 явно видны отрицательные значения сигнала. Отрицательные значения на временном промежутке от 0,375 до 1,75 секунд 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 секунд 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 не редко может производиться не точно или вообще не производится. Поэтому для получения результирующего сигнала используется алгоритм отброса постоянной составляющей. А именно, перевод сигнала в частотную область и вычисления амплитуды нулевой частоты.

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

## Список литературы

1. Постановление Правительства РФ от 21.04.2014 № 366 (ред. от 17.12.2014) «Об утверждении государственной программы Российской Федерации “Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года”». — 36 с.
2. Стратегия развития арктической зоны российской федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года : утв. Президентом РФ 08.02.13 Пр-232. — 11 с.
3. Дисковый режущий инструмент для разрушения снежно-ледяных образований / В. А. Ганжа [и др.] // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2012. — № 2. — 34а – 37.
4. Разрушение прочных снежно-ледяных образований / В. А. Ганжа [и др.] // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2015. — № 3.
5. Пат. 2487970 Рос. федерация, МПК<sup>7</sup> E 01 H 5/12. Рабочий орган для удаления снежно-ледяного наката с поверхности дорог и аэродромов [Текст] / В. А. Ганжа [и др.] (Рос. федерация) ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». — № 2012109412/13 ; заявл. 10.03.2012 ; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20.
6. Желудкевич Р. Б. Разработка мерзлых грунтов землеройными машинами с дисковым инструментом : Монография. — Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. — 196 с.
7. Барон Л. И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами : Разрушение тангенциальными инструментами. — Москва : Наука, 1973. — 172 с.



8. Барон Л. И., Глатман Л. Б., Загорский С. Л. Разрушение горных пород проходческими комбайнами : Разрушение шарошками. — Москва : Наука, 1969. — 146 с.
9. Зеленин А. Н., Карасев Г. Н., Красильников Л. В. Лабораторный практикум по резанию грунтов : Учебное пособие для студентов инженерно-строительных и автомобильно-дорожных вузов. — М. : Высш. школа, 1969. — 310 с.
10. Модернизация стенда для испытания режущего инструмента рабочих органов строительных и дорожных машин / В. Г. Шрам [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2013. — № 3.
11. Пат. 2429459 Рос. федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 M 13/00. стенд для испытания рабочих органов землеройных машин [Текст] / В. А. Ганжа, Р. Б. Желукевич, Ю. Н. Безбородов (Рос. федерация) ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». — № 2010116560/28 ; заявл. 26.04.2010 ; опубл. 20.09.2011, Бюл. № 26.
12. Измерительный комплекс для контроля силы сопротивления снежно ледяных образований резанию дисковым инструментом / А. С. Сатышев [и др.] // Измерение, контроль, информатизация : Материалы XVII международной научно-технической конференции / под ред. Л. И. Сучковой. — Барнаул, 2016. — С. 155 – 158.
13. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул : Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд. — М. : Высш. шк., 1988. — 239 с.