



РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-22>

УДК 004.932:681.5

**Измерение производительности питателя при выпуске угля из подкровельной толщи на основе технологии машинного зрения**

М. С. Никитенко¹   , С. А. Кизилев¹  , Ю. Н. Захаров²  ,
Д. Ю. Худоногов¹, А. Ю. Игнатова³  

¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии

Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация

² Кемеровский государственный университет (КемГУ), г. Кемерово, Российская Федерация

³ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

 ltd.mseng@gmail.com

Аннотация

Технология выпуска угля из подкровельной пачки использует так называемый гравитационный выпуск, когда уголь выпускается из-под кровли «самотеком» под действием силы тяжести. Выпуск при этом можно производить на главный конвейер (забойный – расположенный в закрепленном пространстве), центральный (в западной литературе – задний) и хвостовой (завальный – расположенный в незакрепленном пространстве). Наиболее распространенными на данный момент времени являются комплексы с выпуском на завальный конвейер. Целью исследования является измерение производительности механизированного пластинчатого питателя, подающего уголь от выпускного окна крепи на конвейер в технологии отработки мощных пластов с выпуском на забойный конвейер. Для достижения цели предлагается осуществлять измерение объема с применением технологии машинного зрения. Исследованы способы расчета единичного объема на измерительном участке на трехмерной модели. Проведены лабораторные исследования, в рамках которых оценены относительные погрешности.

Исследования позволили формализовать: способ сбора данных для расчета единичного объема угля; методику расчета единичного объема на измерительном участке; способ расчета производительности питателя на основе системы машинного зрения, а также подходы для физического упрощения сцены, исследуемой машинным зрением. Относительная погрешность менее 10 % при имеющейся точности измерений для построения карты высот говорит о достаточности для инженерного использования предложенного способа расчета. Разработанный математический аппарат для расчетов единичного объема угля на измерительном участке и измерения производительности питателя позволяют создавать алгоритмическое обеспечение с использованием элементарных математических функций: сложение, вычитание, умножение и деление. Данный аспект важен, так как снижает планку требований к среде разработки программного обеспечения, а соответственно, расширяет номенклатуру аппаратных средств, пригодных для выполнения задач расчета производительности питателя.

Ключевые слова

горное дело, добыча угля, лавный комплекс, производительность, выпуск угля, забойный конвейер, объем горной массы, машинное зрение, распознавание образов, распознавание видеоизображений, карта высот

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0017 «Разработка научных основ создания автономных и автоматизированных горных машин, оборудования, технических и управляющих систем на базе перспективных цифровых и роботизированных технологий» (рег. №121121000036-1) и грантов Минобрнауки России (Соглашения №075-15-2022-1199 и №075-15-2022-1190).

Для цитирования

Nikitenko M.S., Kizilov S.A., Zakharov Yu.N., Khudonogov D.Yu., Ignatova A.Yu. Measurement of feeder performance during coal discharge from an underroof seam using machine vision. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):264–273. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-22>



MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Research paper

Measurement of feeder performance during coal discharge from an underroof seam using machine visionM. S. Nikitenko¹   , S. A. Kizilov¹  , Yu. N. Zakharov²  , D. Yu. Khudonogov¹, A. Yu. Ignatova³  ¹ Federal Research Centre of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FRC CCC SB RAS), Kemerovo, Russian Federation² Kemerovo State University (KemSU), Kemerovo, Russian Federation³ Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russian Federation lt.d.mseng@gmail.com**Abstract**

The technology for extracting and discharging coal from an underroof seam uses the so-called gravitational extraction method in which coal is extracted and discharged from under the roof by gravity. Here, coal can be discharged onto the main conveyor (face conveyor, located in the supported area), central conveyor (rear conveyor in Western literature), and tail conveyor (discharge conveyor, located in the unsupported area). The most common facilities used currently are longwall sets of equipment providing discharge onto tail conveyors. The purpose of this study is to measure the performance of a motorised plate feeder supplying coal from the outlet port of a roof support to a conveyor during the extraction of thick seams with discharge onto the face conveyor. To achieve the goal, it is proposed to measure the coal volume using machine vision. Methods for calculating a unit volume in a measuring section using a three-dimensional model were investigated. Laboratory studies were carried out to estimate the relative errors of the methods. The research allowed properly defining: a method for collecting data to calculate the unit volume of coal; a method for calculating the unit volume in the measuring section; a method for calculating the feeder performance using machine vision, and approaches for physically simplifying the video scene examined by machine vision. A relative error of less than 10 % with the existing measurement accuracy for constructing a coal layer surface height map indicates the sufficiency of the proposed calculation method for engineering use. The developed mathematical apparatus for calculating the unit volume of coal at the measuring section and measuring the feeder performance allows creating algorithmic software using the elementary mathematical functions of addition, subtraction, multiplication, and division. This aspect is important because it lowers sights for the software development environment, and therefore expands the range of hardware suitable for calculating the feeder performance.

Keywords

mining, coal mining, coalface, performance, coal discharge, face conveyor, rock mass volume, machine vision, pattern recognition, video image recognition, height map

Acknowledgements

This work was carried out within the framework of the government assignment for the Federal State Scientific Research Centre of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences on the Project FWEZ-2021-0017 – “Development of Scientific Foundations for the Creation of Autonomous and Automated Mining Machinery, Equipment, and Technical and Control Systems Based on Advanced Digital and Robotic Technologies” (Reg. No. 121121000036-1) and grants of the Ministry of Education and Science of Russia (Agreement No. 075-15-2022-1199 and Agreement No. 075-15-2022-1190).

For citation

Nikitenko M. S., Kizilov S. A., Zakharov Yu. N., Khudonogov D. Yu., Ignatova A. Yu. Measurement of feeder performance during coal discharge from an underroof seam using machine vision. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):264–273. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-09-22>

Введение

Технология выпуска угля из подкровельной пачки использует так называемый гравитационный выпуск, когда уголь выпускается из-под кровли «самотеком» под действием силы тяжести [1, 2]. Выпуск при этом можно производить на главный конвейер (забойный – расположенный в закрепленном пространстве), центральный (в западной литературе – задний) и хвостовой (завальный – расположенный в незакрепленном пространстве) [3]. Наиболее распространенными на данный момент времени являются комплексы с выпуском на завальный конвейер [4–7].

В Российской Федерации предложен подход осуществлять управляемый выпуск угля, перемещая поток горной массы с помощью механизированного питателя из выпускного окна на главный конвейер [8, 9]. К его основным преимуществам относятся небольшие габаритные размеры секции крепи, сравнимые с габаритами крепи для классического лавного очистного комплекса, а также возможность производить одно-временный групповой выпуск из нескольких секций, реализуя перспективные технологии добычи угля с использованием волнового и площадного выпуска [8, 9]. Реализация столь сложных технологических



процессов, как волновой и площадной выпуск, требует разработки системы, контролирующей в реальном времени объём угля, подаваемый питателем из выпускного окна крепи на главный конвейер [9–12]. При групповом выпуске превышение объёма подачи угля выше расчётного значения из одного питателя может привести к перегрузу конвейера у точек разгрузки следующих питателей и просыпанию угля.

В ФИЦ УУХ СО РАН (FRC CCC SB RAS) на основе дискретно-событийных моделей рассчитаны оптимальный объём выпускаемого угля для каждой секции крепи, последовательность и рациональное количество работающих питателей, позволяющие обеспечить равномерность выпуска и максимальную загрузку конвейера [13–15]. Однако шахтного оборудования, способного эффективно выполнять задачу по измерению объёма выпускаемого пластинчатым питателем угля, в заданных условиях на рынке не представлено.

В мировой практике известны решения, применяющие источники когерентного света (лазерные излучатели) подсветки сыпучих веществ для определения их объёма. Одним из распространённых применений таких устройств являются измерители производительности конвейеров машинным зрением [16–19], которые с помощью триангуляции создают массив значений, характеризующий высоту слоя перемещаемого конвейером вещества в месте его пересечения лазерным лучом. Однако данный способ позволяет измерять только объём сыпучего вещества, перемещаемого через сканер с постоянной скоростью. Существует оборудование, которое использует лазерные 3D-сканеры (трехмерные LIDAR) для определения объёмов сыпучих веществ, перемещаемых с разными скоростями или находящихся в статичном состоянии [20, 21]. Однако вопрос применения технологии в условиях угольных шахт слабо проработан за редким исключением, как, например, австралийский проект ExScan, который пока не вышел на стадию коммерческих продаж и является штучным экспериментальным изделием [22].

Проведенный анализ показал, что в литературе представлено достаточно много работ, связанных с лазерной оценкой объёма, работающих с применением машинного зрения. Однако конкретных подходов к измерению объёма горной массы, перемещаемой питателем в условиях выпуска угля подкровельной толщи не выявлено. Проблема перегруза в современных комплексах с гравитационным выпуском решается малым количеством одновременно работающих на выпуск секций – от 1 до 5 шт. При этом используется дополнительный конвейер, что сводит возможность перегруза до минимума. Также расположение конвейера в незакрепленном пространстве делает последствия перегруза менее опасными, чем при выпуске на главный конвейер, но может приводить к увеличению потерь угля. На данный момент времени автоматизированными средствами при выпуске угля факт наличия угля не фиксируется. При подходе, описанном в [3], заслонка выпускного окна открывается на заданный промежуток времени, а за-

тем закрывается без обратной связи и учета успешности проведения выпуска. Наличие выпускаемого угля фиксируется визуально в районе перегружателя. Главной проблемой измерения производительности пластинчатого питателя является отсутствие потока угля с постоянной скоростью, так как пластинчатый питатель выполняет возвратно-поступательные движения с частотой близкой к 1 Гц. Такой тип питателя перемещает уголь дискретно небольшими партиями с частотой дискретизации, равной частоте работы питателя. Конструктивные особенности и способ работы питателей подобного типа не позволяют применить стандартные способы измерения производительности на основе взвешивания или сканирования формы потока на конвейерах.

Для опытно-конструкторской разработки задачу измерения объёма угля, подаваемого каждым питателем на конвейер, авторы разделили на несколько подзадач:

1. Разработать способ расчета производительности исходя из данных о единичном объеме и скорости его замещения.
2. Выбрать математический аппарат расчета единичного объёма угля, находящегося на измерительном участке.
3. Разработать методику для первичной верификации и валидации расчета единичного объёма угля, находящегося на измерительном участке.
4. Провести первичные верификацию и валидацию расчета единичного объёма угля, находящегося на измерительном участке.
5. Провести анализ результатов первичных верификации и валидации, на основе которого выбрать алгоритм для получения расчетных данных системой машинного зрения.

Методы

Первоначально определено место проведения замеров вдоль зоны перегрузки угля питателем от выпускного окна до конвейера. Практически на всем пути транспортировки угля от выпускного окна до конвейера работа питателя при возвратно-поступательном движении может менять порядок распределения выпускаемой горной массы при её перемещении. Единственный участок транспортировки, на котором направление движения угольной массы приобретает определённое направление и постоянную скорость замещения, – выпускной лоток. Выпускной лоток представляет собой откидной элемент, смонтированный на питателе, по которому уголь поступает с питателя на конвейер через технологический проем между ним и секцией крепи. Одним из возможных методов расчета производительности питателя является расчет объёма угля на некотором заданном участке лотка питателя (измерительном участке) с последующим определением времени замещения данного участка новой порцией угля. Математический аппарат для расчета производительности питателя в этом случае сводится к расчету объёма тела, представляющего собой объём угольной массы на измерительном участке в единицу времени:



$$P_{\text{пит}} = V_{\text{ед}} \cdot T_{\text{сму}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{пит}}$ – производительность питателя, $\text{м}^3/\text{с}$; $V_{\text{ед}}$ – единичный объем угля на измерительном участке, м^3 ; $T_{\text{сму}}$ – частота смены измерительного участка, с^{-1} , прямо пропорциональна частоте работы питателя и подступает в формулу расчета от средств автоматизации лавного комплекса.

Исходя из этого задаются входные данные, необходимые для расчета объема угля на измерительном участке. Соответственно, для измерения объема выпускаемого угля в единицу времени необходимо измерить его объем и скорость замещения на измерительном участке. Оптимальная производительность питателя в соответствии с дискретно-событийной моделью выпуска [13] рассчитывается в килограммах за секунду. Таким образом, через насыпную плотность угля рассчитывается производительность

$$P_{\text{пит.кг/с}} = \rho_{\text{уг}} \cdot V_{\text{ед}} \cdot T_{\text{сму}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{уг}}$ – насыпная плотность угля на участке разрабатываемого пласта.

Скорость замещения является величиной, получаемой на основании данных при пусконаладочных работах, и зависит от фракции выпускаемого угля и частоты работы питателя. При измерении объема форма измерительного участка – прямоугольник. Измеряемая угольная масса, находящаяся на площади участка измерения, имеет переменную высоту по всей его площади. Для расчёта объема угля необходимы данные, характеризующие его высоту относительно уровня измерительного участка в заданных точках.

Наиболее очевидным выбором для получения набора данных, необходимых для работы математического аппарата, является система машинного зрения, совмещенная с нейросетевым интерфейсом распознавания образов [13, 14]. Однако для корректной работы нейросети, распознающей образы, как правило, требуется значительная обучающая выборка, которой не будет до введения в опытную работу лавного комплекса с соответствующей конструкцией. А низкое качество изображения, получаемого с современных видеокамер, сертифицированных для установки на лавных комплексах, ограничивает возможность применения классических алгоритмов распознавания видеосцены. Это однозначно говорит об актуальности и необходимости упрощения анализируемой видеосцены до её компьютерной обработки.

Для решения такой задачи предложено спроецировать на исследуемую поверхность прямоугольную сетку лазерных лучей контрастного цвета (далее – световые маркеры). Световые маркеры обеспечат проекцию на неровную поверхность и изменят свою форму с прямолинейной на форму того участка, на который он спроецировался, что позволит получить информацию о форме участка под световым маркером. Следующий шаг – определить координаты светового маркера относительно уровня измерительного участка в любой его точке в ручном режиме без использования методик нейросетевого распознавания видеоряда.

Наличие светового маркера значительно упрощает распознавание видеосцены машинным зрением, создавая на картинке сцены четкий контрастный по освещённости и цвету участок относительно других объектов, который требуется обработать, исключив лишнюю информацию из изображения на стадии предпроцессинга. Такой подход определит алгоритмы распознавания образов, снизив требования к компьютерной мощности устройства, на котором производится обработка видеосигнала.

Результаты

Для расчета объема угля на измерительном участке измерялась его высота только в точках пересечения световых маркеров, формируя таким образом карту высот измерительного участка.

Представим измерительный участок в виде совокупности параллелограммов с равными по размерам основаниями и высотой, соответствующей данным из карты высот. Сумма объемов полученных параллелограммов будет являться объемом фигуры на исследуемом участке.

Первичная верификация предложенного способа выполнена на референсной фигуре с криволинейной поверхностью – полусфере, объем которой можно предварительно рассчитать по формуле, задав габаритные размеры, сопоставимые с размером измерительного участка на реальном питателе. Ожидаемый объем полусферы $V_{\text{ож}}$ рассчитан по формуле (1) и составил $261,8 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$:

$$V_{\text{ож}} = \frac{4}{3} \frac{\pi r^3}{2}. \quad (3)$$

Входные данные: радиус r , мм, 500; шаг сетки световых маркеров по оси x , мм, $X = 50 - \text{const}$; шаг сетки световых маркеров по оси y , мм, $Y = 50 - \text{const}$; координата точки по оси $x - x_i$; координата точки по оси $y - y_n$; высота слоя, мм, на точке с координатами – $h_{x,y}$.

Таким образом, эталонная фигура, объем которой рассчитывается согласно предложенному методу, имеет в своём основании круг радиусом 500 мм. Зона измерения представлена квадратом, имитирующим измерительный участок на поверхности питателя, размером 1000×1000 мм. Референсная фигура вписана в зону измерения. Световые маркеры представлены сечениями на зоне измерения по вертикали и горизонтали с шагом 50 мм в обоих направлениях.

Для сбора данных предложено произвести условное рассечение референсной фигуры по местам прохождения световых маркеров, получив таким образом набор малых фигур. Тогда малая фигура представляет собой объемное тело с двумя равными параллельными боковыми поверхностями, которые являются криволинейными трапециями, полученными в результате рассечения полусферы в координате h_y . Объем малой фигуры V_1 можно рассчитать по формуле:

$$V_1 = S_{\text{бп}} \cdot Y, \quad (4)$$

где $S_{\text{бп}}$ – площадь боковой поверхности; Y – размер малой фигуры по оси y . Площадь криволинейной

трапеции – вычисляется с помощью определённого криволинейного интеграла. При расчёте производительности питателя не требуется высокая точность в результатах, расчетный объём пренебрежимо мал относительно общей секундной производительности, но важна скорость проводимых вычислений. Для проведения расчета высоты прямоугольников h_x с шагом X заносятся в таблицу. Полученная таблица представляет карту высот для расчета объема малой фигуры. Тогда $S_{\text{оп}}$ можно рассчитать по формуле:

$$S_{\text{оп}} = X \sum_{x=1}^{x_2} h_x; \quad (5)$$

соответственно:

$$V_1 = YX \sum_{x=1}^{x_2} h_x. \quad (6)$$

Следовательно, объем всей эталонной фигуры $V_{\text{расч}}$ представлен в виде суммы объемов всех прямоугольных параллелепипедов, входящих в состав всех малых фигур, на которые была разделена референсная фигура. Тогда $V_{\text{расч}}$ рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{расч}} = XY \sum_{y=1}^{y_2} \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y}, \quad (7)$$

где

$$\sum_{y=1}^{y_2} \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y} -$$

сумма всех высот, измеренных в сечениях образца, с координатами $h_{x,y}$.

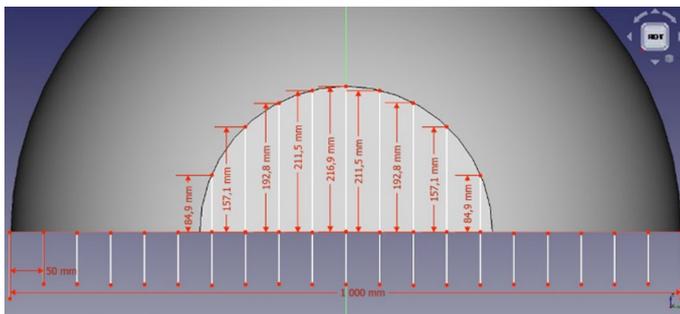
Референсная фигура была построена с использованием CAD системы моделирования FreeCAD. Полученная объёмная модель полусферы последовательно рассекалась по оси X с заданным в условии шагом, затем создавалась карта высот криволинейной поверхности в каждом полученном сечении, которое представляло собой малую фигуру. Высоты измерялись с шагом X . Процесс последовательного получения координат высот в качестве данных для формирования карты высот показан на рис. 1.

Далее данные высот занесены в таблицу, общий вид которой показан на рис. 2.

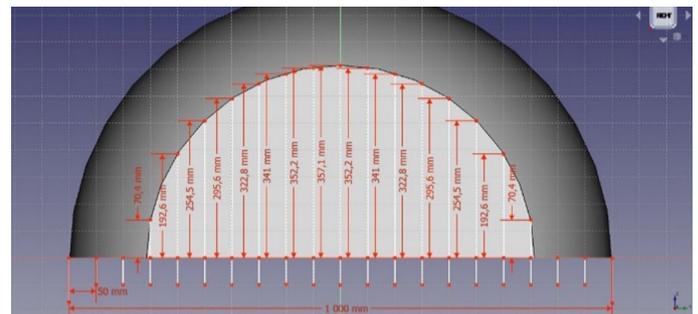
Полученная карта высот имитирует информацию от системы машинного зрения. Для контроля достоверности результатов измерений по данным таблицы построена диаграмма поверхности, показанная на рис. 3, а.

Диаграмма поверхности, построенная с использованием MS Excel, показывает, что замеры при построении карты высот выполнены без грубых ошибок и ими можно пользоваться для первичной верификации способа расчета объёма.

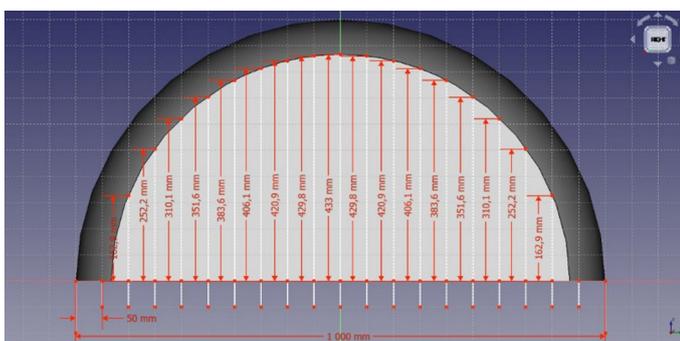
Как видно из рис. 1, сечениями Y образуются малые тела, имеющие плоские боковые стороны и основание, ограниченные сверху криволинейной поверхностью, что соответствует предложенному методу расчета. Таким образом, вся референсная фигура представляется в виде набора соответствующих прямоугольных параллелепипедов, имеющих основание размером X на Y . На рис. 3, б показано изображение упрощенного референсного тела, полученного в результате преобразования всех малых тел в прямоугольные параллелепипеды.



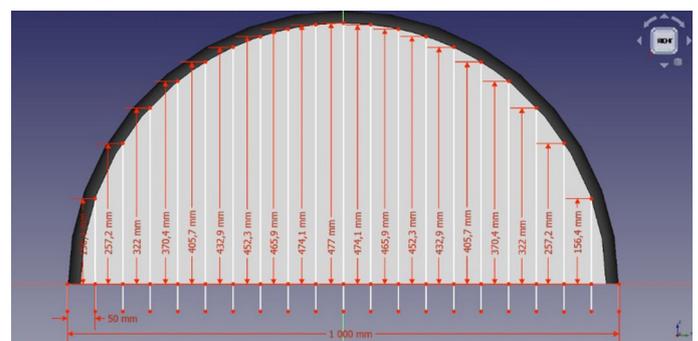
а



б



в



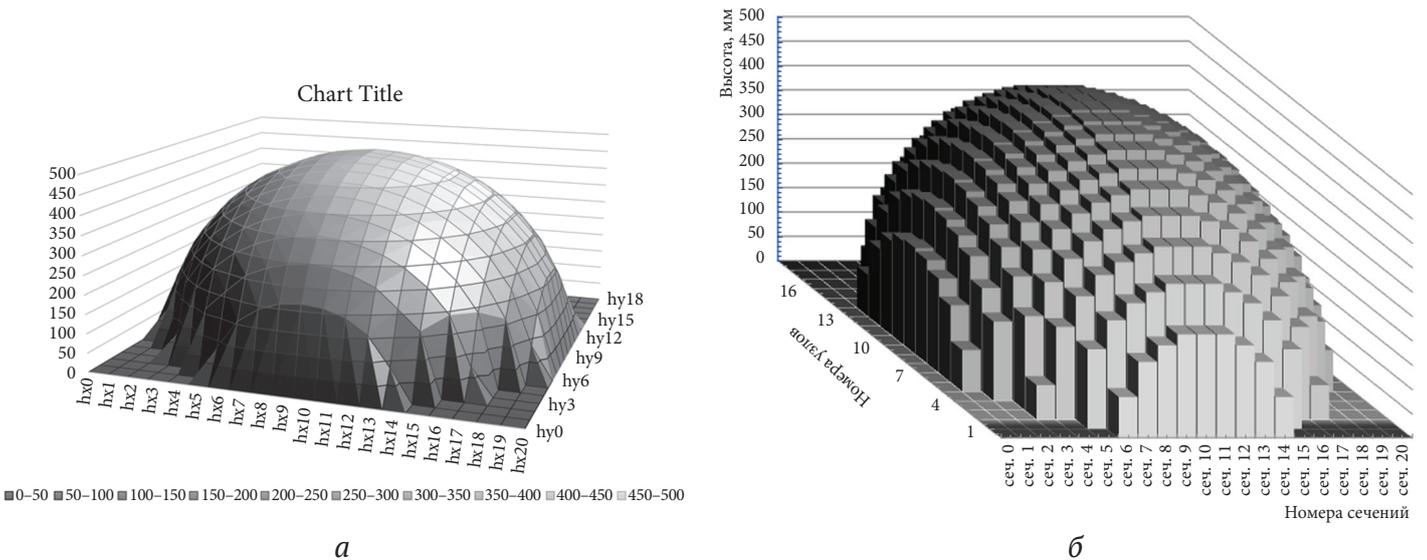
г

Рис. 1. Процесс получения координат высот вершин прямоугольников по сечениям для формирования карты высот: а – сечение 2; б – сечение 4; в – сечение 6; г – сечение 8

Координаты высот	h_x	h_{x+1}	...	h_{x+i}
h_y	$h_{x,y}$	$h_{x+1,y}$...	$h_{x+i,y}$
h_{y+1}	$h_{x,y+1}$	$h_{x+1,y+1}$...	$h_{x+i,y+1}$
...
h_{y+n}	$h_{x,y+n}$	$h_{x+1,y+n}$...	$h_{x+i,y+n}$

Рис. 2. Общий вид таблицы данных карты высот:

$h_{x,y}$ – высота от нулевой отметки с координатами x, y до кривой, ограничивающей поверхность сечения в месте разреза



а

б

Рис. 3. Представление референсной фигуры:

а – в виде диаграммы поверхности по данным измерений; б – полученное методом прямоугольников на основе измерения

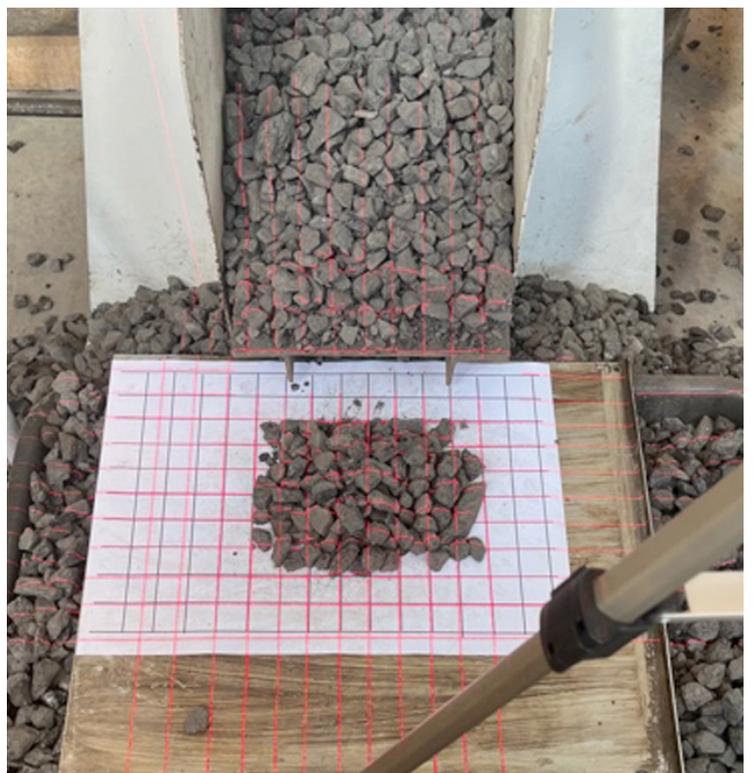


Рис. 4. Процесс валидации методики на модели измерительного участка



Рассчитанный по формуле (7) объем референсной фигуры составил $259,3 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$. Относительная погрешность измерения – 0,95 % от ожидаемого результата.

Для валидации методики проведена серия лабораторных экспериментов с применением средств проецирования лазерной сетки на плоскую поверхность (измерительный участок), имитирующую выпускной лоток питателя секции крепи. В ходе экспериментов на измерительном участке размещался известный объем угля (рис. 4) с заранее измеренными насыпной плотностью и весом, что позволило рассчитать его объем математически.

Для построения карты высот используемый слой угля зондировался металлической спицей в месте пересечения лазерных лучей, затем уровень угля фиксировался на спице маркером. По данным измерений строилась карта высот, которая представлена в табл. 1, где y – координата точки измерения в поперечном сечении измерительного участка с точкой отсчета со стороны питателя, а x – координата точки измерения в продольном сечении измерительного участка с точкой отсчета в крайней левой части координатной сетки.

Таблица 1

Карта высот угля на измерительном участке, мм

$h_{x,y}$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
y_1	10	27	8	5	16	16	0	0
y_2	14	23	11	27	15	26	23	0
y_3	20	25	35	34	40	13	35	17
y_4	18	19	34	43	32	29	27	12
y_5	25	20	30	25	26	21	20	0
y_6	20	5	12	26	28	21	13	0
y_7	0	0	17	13	10	8	24	0

Исходя из насыпной плотности угля и веса отобранной пробы рассчитан ожидаемый объем $V_{\text{ож}} = 0,74 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$.

Размер ячеек сетки световых маркеров $h_x = 25 \text{ мм}$, $h_y = 25 \text{ мм}$.

Используя формулу (5), получаем расчетный объем $V_{\text{расч}} = 0,63 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$.

Относительная ошибка $V_{\text{расч}}$ от $V_{\text{ож}}$ составила 13,55 %.

Полученная относительная ошибка достаточно велика, что связано с двумя факторами: 1 – несовершенство примененных методов измерения; 2 – упрощение методики расчета объема, плохо учитывающее неоднородность поверхности объема угля и его распределение по измерительному участку.

Для компенсации в расчете неоднородности поверхности объема измеряемого угля предложен расчет методом прямоугольников с двойным пересчетом в противоположных направлениях и последующим усреднением результата:

$$V_{\text{расч1}} = \frac{\left(\sum_{y=1}^{y_2-1} \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y} + \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y_2-1} + \sum_{y=2}^{y_2} \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y} + \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,2} \right) YX}{2}. \quad (8)$$

Применим формулу (8) к данным из табл. 1. Тогда $V_{\text{расч1}} = 0,67 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$.

Относительная ошибка $V_{\text{расч1}}$ от $V_{\text{ож}}$ составила 8,87 %.

Обсуждение результатов

Использованный в эксперименте способ построения карты высот слоя угля имеет погрешность, так как работа ведется с насыпным материалом переменной фракции, соответственно, при проведении измерения часто происходят смещения частиц. Несмотря на это представленный выше подход показывает точность при прямом расчете объема с относительной погрешностью менее 14 %. Применение измерений с проходом в два противоположных направления относительно поперечного сечения измерительного участка с последующим усреднением результата позволяет снизить относительную погрешность для данного случая практически на 5 %. Результат в 5 % является непостоянной величиной и зависит от распределения объема угля относительно поперечного сечения измерительного участка. Относительная погрешность менее 10 % при имеющейся точности измерений для построения карты высот говорит о достаточной для инженерного использования точности предложенного способа расчета и небольшом влиянии погрешностей отдельных измерений на общий результат расчета объема.

На данный момент времени, учитывая результаты валидации, можно составить формулу расчета производительности питателя, кг/с, подставив (8) в (2). Тогда:

$$P_{\text{пит.кг/с}} = \frac{\left(\sum_{y=1}^{y_2-1} \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y} + \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y_2-1} + \sum_{y=2}^{y_2} \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,y} + \sum_{x=1}^{x_2} h_{x,2} \right) YX}{2} \rho_{\text{уг}} T_{\text{сиг}}. \quad (9)$$

Полученная формула (9) позволила начать разработку программного обеспечения для машинного зрения, измеряющего высоту слоя угля в точках пересечения световых маркеров.

Заключение

Предложенный способ позволяет проводить оперативную оценку объема горной массы, перемещаемой пластинчатым питателем с использованием технологий машинного зрения. Решена задача контроля объема выпускаемого питателем угля при отработке мощных пластов лавными комплексами с выпуском на забойный конвейер с точностью, достаточной для практического применения. Разработанный математический аппарат для расчетов единичного объема угля на измерительном участке (формула (8)) и измерения производительности питателя (формула (9)) позволяет создавать алгоритмическое обеспечение с использованием элементарных математических функций: сложение, вычитание, умножение и деление. Данный аспект важен, так как снижает планку требований к среде разработки программного обеспечения, а соответственно, расширяет номенклатуру аппаратных средств, пригодных для выполнения задач расчета производительности питателя.



Список литературы

1. Клишин В.И., Анферов Б.А., Кузнецова Л.В. Направления совершенствования разработки мощных пластов с выпуском угля подкровельной толщи. В: *Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2017). Сборник трудов Международной научно-практической конференции*. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; 2017. С. 57–63.
2. Клишин В.И., Клишин С.В. Состояние и направление развития технологии разработки мощных угольных пластов механизированными крепями с выпуском. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2019;(1):162–174.
3. Peng S. S. *Longwall mining*. 3rd edition. Leiden: CRC Press/Balkema; 2020. 562 p.
4. Le T.D., Mitra R., Oh J., Hebblewhite B. A review of cavability evaluation in longwall top coal caving. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017;27(6):907–915. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.06.021>
5. Mundry S., Sandgathe C. Automated Cat longwall top coal caving. In: *Efficient Mining of High Seams with Automated LTCC Operations*. Caterpillar Inc.; 2018. Pp. 12–14. URL: <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20180716-40601-27335> (Дата обращения: 01.08.2022).
6. Medhurst T., Rankine R., Kelly M. Development of a method for a longwall top coal caveability assessment. In: *Coal operators' conference*. 12–14 February 2014. Wollongong: University of Wollongong; 2014. Pp. 42–50. URL: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2159&context=coal>
7. Le T. D. *Longwall Top Coal Caving mechanism and cavability assessment*. [PhD thesis in Mining Engineering]. Sydney; 2018. <https://doi.org/10.26190/unsworks/20236>
8. Клишин В.И., Шундулиди И.А., Ермаков А.Ю., Соловьев А.С. *Технология разработки запасов мощных пологих пластов с выпуском угля*. Новосибирск: Наука; 2013. 248 с.
9. Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Варфоломеев Е.Л., Борисов И.Л. Взаимодействие механизированных крепей с межслоевой толщиной в системах с выпуском угля. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(S48):87–94. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-48-87-94>
10. Кизилов С.А., Никитенко М.С., Неоджи Б. и др. Автоматизация управления технологическими процессами при отработке мощных пластов с выпуском угля подкровельной толщи. *Горная промышленность*. 2017;(6):96–99. URL: <https://mining-media.ru/en/articles/articleen/13196-automation-of-process-control-in-thick-seam-mining-with-top-coal-caving>
11. Nikitenko M. S., Kizilov S. A., Nikolaev P. I., Kuznetsov I. S. Technical devices of powered roof support for the top coal caving as automation objects. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XI All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation) "Automation systems in education, science and production, 2017"*. 14–16 December 2017, Novokuznetsk, Russian Federation. 2017;354:012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/354/1/012014>
12. Nikitenko M. S., Kizilov S. A. Technical and technological platforms for creating robotized complexes for the development of thick seam deposits. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 377, International Scientific and Research Conference on Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources*. 4–7 June 2019, SibSIU, Novokuznetsk, Russia. 2019;377:012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/377/1/012033>
13. Стародубов А.Н., Зиновьев В.В., Клишин В.И., Крамаренко В.А. Применение имитационного моделирования для исследования режимов выпуска угля подкровельной толщи. В: *9-я всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности*. Екатеринбург; 2019. С. 540–547. URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2019-immmod-540-547.pdf>
14. Starodubov A., Sinoviev V., Totskiy A., Klishin V. Review of mining equipment with controlled robotized subvel caving with specialized software. In: *E3S Web of Conferences. Vth International Innovative Mining Symposium*. 2020;174:03012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017403012>
15. Starodubov A. N., Sinoviev V. V., Klishin V. I. The development of simulating system of robotized technologies for thick and acute coal seams. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1749(1):012040. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1749/1/012040>
16. Heyduk A. Bulk density estimation using a 3-dimensional image acquisition and analysis system. In: *E3S Web of Conferences. Mineral Engineering Conference MEC2016*. 2016;8:01060. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160801060>
17. Heyduk A. Laser triangulation in 3-dimensional granulometric analysis. *Archives of Mining Sciences*. 2016;61(1):15–27. <https://doi.org/10.1515/amsc-2016-0002>
18. Min F., Lou A., Wei Q. Design and experiment of dynamic measurement method for bulk material of large volume belt conveyor based on laser triangulation method. In: *IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 7th Annual International Conference on Material Science and Environmental Engineering*. 15–16 November 2019. Wuhan, Hubei, China. 2020;735(1):012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/735/1/012029>
19. Fojtík D. Measurement of the volume of material on the Conveyor Belt measuring of the volume of wood chips during transport on the Conveyor Belt using a laser scanning. In: *Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference (ICCC)*. 28–30 May 2014. Velke Karlovice, Czech Republic. Pp. 121–124. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2014.6843581>
20. Amorim L.L., Mutz F., De Souza A.F. et al. Simple and effective load volume estimation in moving trucks using lidars. In: *32nd SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*. 28–30 October 2019. Rio de Janeiro, Brazil. Pp. 210–217. <https://doi.org/10.1109/SIBGRAPI.2019.00036>



21. Zeng F., Wu Q., Chu X., Yue Z. Measurement of bulk material flow based on laser scanning technology for the energy efficiency improvement of belt conveyors. *Measurement*. 2015;75:230–243. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.05.041>
22. Dunn M., Reid P., Malos J. Development of a protective enclosure for remote sensing applications—case study: laser scanning in underground coal mines. *Resources*. 2020;9(5):56. <https://doi.org/10.3390/resources9050056>
23. Macpherson T., Churchland A., Sejnowski T. et al. Natural and artificial intelligence: a brief introduction to the interplay between AI and neuroscience research. *Neural Networks*. 2021;144:603–613. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.09.018>
24. Акулов М.С., Гладких С.А., Ланкина М.Ю., Бакланов А.Н. Обработка фото и видеоизображений с помощью нейронных сетей в программе LABVIEW. *Современные наукоемкие технологии*. 2019;(3–1):12–17. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37434>

References

1. Klishin V.I., Afyorov B.A., Kuznetsova L.V. Areas of improving development of thick seams with drawing of the coal from under the roof strata. In: *Innovations in Fuel and Energy Complex and Mechanical Engineering (FEC-2017). Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Kemerovo: T.F. Gorbachev State Technical University; 2017. Pp. 57–63. (In Russ.)
2. Klishin V.I., Klishin S.V. Current state and direction of development of thick coal seams exavation technology by powered roof supports with controlled coal discharge. *Izvestija Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2019;(1):162–174. (In Russ.)
3. Peng S. S. *Longwall mining*. 3rd edition. Leiden: CRC Press/Balkema; 2020. 562 p.
4. Le T.D., Mitra R., Oh J., Hebblewhite B. A review of cavability evaluation in longwall top coal caving. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017;27(6):907–915. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.06.021>
5. Mundry S., Sandgathe C. Automated Cat longwall top coal caving. In: *Efficient Mining of High Seams with Automated LTCC Operations*. Caterpillar Inc.; 2018. Pp. 12–14. URL: <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20180716-40601-27335> (Accessed: 01.08.2022).
6. Medhurst T., Rankine R., Kelly M. Development of a method for a longwall top coal caveability assessment. In: *Coal operators' conference*. 12–14 February 2014. Wollongong: University of Wollongong; 2014. Pp. 42–50. URL: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2159&context=coal>
7. Le T.D. *Longwall Top Coal Caving mechanism and cavability assessment*. [PhD thesis in Mining Engineering]. Sydney; 2018. <https://doi.org/10.26190/unsworks/20236>
8. Klishin V.I., Shundulidi I.A., Ermakov A. Yu., Soloviev A. S. *Technique for development of reserves of thick shallow seams with coal discharge*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 2013. 248 p. (In Russ.)
9. Klishin V.I., Opruk G. Yu., Varfolomeev E.L., Borisov I.L. Interaction of mechanized support with interlayer thickness in systems with subvel caving. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(S48):87–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-48-87-94>
10. Kizilov S.A., Nikitenko M. S., Neodzhy B. et al. Automation of process control in thick seam mining with top coal caving. *Russian Mining Industry*. 2017;(6):96–99. (In Russ.) URL: <https://mining-media.ru/en/articles/article/13196-automation-of-process-control-in-thick-seam-mining-with-top-coal-caving>
11. Nikitenko M. S., Kizilov S.A., Nikolaev P.I., Kuznetsov I. S. Technical devices of powered roof support for the top coal caving as automation objects. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XI All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation) "Automation systems in education, science and production, 2017"*. 14–16 December 2017, Novokuznetsk, Russian Federation. 2017;354:012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/354/1/012014>
12. Nikitenko M.S., Kizilov S.A. Technical and technological platforms for creating robotized complexes for the development of thick seam deposits. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 377, International Scientific and Research Conference on Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources*. 4–7 June 2019, SibSIU, Novokuznetsk, Russia. 2019;377:012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/377/1/012033>
13. Starodubov A. N., Sinoviev V. V., Klishin V. I., Kramarenko V. A. Application of simulating modeling for research of subvel caving modes. In: *9th All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its Application in Science and Industry*. Yekaterinburg; 2019. Pp. 540–547. (In Russ.) URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2019-immmod-540-547.pdf>
14. Starodubov A., Sinoviev V., Totskiy A., Klishin V. Review of mining equipment with controlled robotized subvel caving with specialized software. In: *E3S Web of Conferences. Vth International Innovative Mining Symposium*. 2020;174:03012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017403012>
15. Starodubov A.N., Sinoviev V.V., Klishin V.I. The development of simulating system of robotized technologies for thick and acute coal seams. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1749(1):012040. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1749/1/012040>
16. Heyduk A. Bulk density estimation using a 3-dimensional image acquisition and analysis system. In: *E3S Web of Conferences. Mineral Engineering Conference MEC2016*. 2016;8:01060. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160801060>



17. Heyduk A. Laser triangulation in 3-dimensional granulometric analysis. *Archives of Mining Sciences*. 2016;61(1):15–27. <https://doi.org/10.1515/amsc-2016-0002>
18. Min F., Lou A., Wei Q. Design and experiment of dynamic measurement method for bulk material of large volume belt conveyor based on laser triangulation method. In: *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 7th Annual International Conference on Material Science and Environmental Engineering. 15–16 November 2019. Wuhan, Hubei, China. 2020;735(1):012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/735/1/012029>
19. Fojtik D. Measurement of the volume of material on the Conveyor Belt measuring of the volume of wood chips during transport on the Conveyor Belt using a laser scanning. In: *Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference (ICCC)*. 28–30 May 2014. Velke Karlovice, Czech Republic. Pp. 121–124. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2014.6843581>
20. Amorim L.L., Mutz F., De Souza A.F. et al. Simple and effective load volume estimation in moving trucks using lidars. In: *32nd SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*. 28–30 October 2019. Rio de Janeiro, Brazil. Pp. 210–217. <https://doi.org/10.1109/SIBGRAPI.2019.00036>
21. Zeng F., Wu Q., Chu X., Yue Z. Measurement of bulk material flow based on laser scanning technology for the energy efficiency improvement of belt conveyors. *Measurement*. 2015;75:230–243. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.05.041>
22. Dunn M., Reid P., Malos J. Development of a protective enclosure for remote sensing applications—case study: laser scanning in underground coal mines. *Resources*. 2020;9(5):56. <https://doi.org/10.3390/resources9050056>
23. Macpherson T., Churchland A., Sejnowski T. et al. Natural and artificial intelligence: a brief introduction to the interplay between AI and neuroscience research. *Neural Networks*. 2021;144:603–613. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.09.018>
24. Akulov M.S., Gladkikh S.A., Lankina M. Yu., Baklanov A.N. Processing photos and videos by using neural networks in the LABVIEW program. *Sovremennyye Naukoyemkiye Tekhnologii*. 2019;(3–1):12–17. (In Russ.) URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37434>

Информация об авторах

Михаил Сергеевич Никитенко – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8752-1332](https://orcid.org/0000-0001-8752-1332), Scopus ID [55748886500](https://scopus.com/authorid/55748886500), ResearcherID [E-3893-2014](https://orcid.org/E-3893-2014); e-mail [ltd.mseng@gmail.com](mailto:mseng@gmail.com)

Сергей Александрович Кизилев – научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-2554-1383](https://orcid.org/0000-0003-2554-1383), Scopus ID [57203142801](https://scopus.com/authorid/57203142801); e-mail sergkizilov@gmail.com

Юрий Николаевич Захаров – доктор физико-математических наук, профессор, Кемеровский государственный университет (КемГУ), г. Кемерово, Российская Федерация; Scopus ID [56825350700](https://scopus.com/authorid/56825350700); e-mail zaharovyn@yandex.ru

Данила Юрьевич Худоногов – научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail admolv@gmail.com

Алла Юрьевна Игнатова – кандидат биологических наук, доцент кафедры химической технологии твердого топлива и экологии, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (КузГТУ), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8061-8684](https://orcid.org/0000-0001-8061-8684), Scopus ID [6701747560](https://scopus.com/authorid/6701747560); e-mail allaignatova@rambler.ru

Information about the authors

Mikhail S. Nikitenko – Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8752-1332](https://orcid.org/0000-0001-8752-1332), Scopus ID [55748886500](https://scopus.com/authorid/55748886500), ResearcherID [E-3893-2014](https://orcid.org/E-3893-2014); e-mail: ltd.mseng@gmail.com

Sergey A. Kizilov – Researcher, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; ORCID [0000-0003-2554-1383](https://orcid.org/0000-0003-2554-1383), Scopus ID [57203142801](https://scopus.com/authorid/57203142801); e-mail sergkizilov@gmail.com

Yuri N. Zakharov – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; Scopus ID [56825350700](https://scopus.com/authorid/56825350700); e-mail zaharovyn@yandex.ru

Danila Yu. Khudonogov – Researcher, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: admolv@gmail.com

Alla Yu. Ignatova – Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Solid Fuels and Ecology, T.F. Gorbachev State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8061-8684](https://orcid.org/0000-0001-8061-8684), Scopus ID [6701747560](https://scopus.com/authorid/6701747560); e-mail allaignatova@rambler.ru

Поступила в редакцию	29.09.2022	Received	29.09.2022
Поступила после рецензирования	15.10.2022	Revised	15.10.2022
Принята к публикации	23.10.2022	Accepted	23.10.2022