ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin,2022;(12-2):17—33
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621. 926. 88 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_17

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ БРОНИ ПОДВИЖНОГО КОНУСА В КОНУСНОЙ ДРОБИЛКЕ ДЛЯ ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С. И. Анциферов[1], Е. А. Сычев[1], А. В. Карачевцева[1], А. А. Обернихин[1]

[1] Белгородский Государственный Технологический Университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия

Аннотация: Дано описание принципиальной схемы конусной дробилки среднего дробления, которые используются на предприятиях добычи ископаемых в горной промышленности и пути повышения эффективности процесса измельчения за счет модернизации брони дробящего конуса. Основой для разработки математической модели, послужил цифровой двойник конусной дробилки среднего дробления с модернизируемой конструкцией брони дробящего конуса, разработанный в CAD/CAM/CAE-системе NX. Данная модернизация конструкции брони дробящего конуса направлена на повышение угла захвата машины и увеличения производительности за счет уменьшения количества преждевременного выпадения крупных кусков из рабочей камеры дробилки. При попадании материала в рабочую зону дробилки чаще всего материал лещадной формы проваливается в разгрузочное отверстие. Модернизация брони дробящего конуса позволяет сдерживать его за счет каблучкообразного выступа у основания конуса, а увеличение угла захвата позволяет повысить объем рабочей камеры конусной дробилки. Базовые математические расчеты угла захвата, позволил спроектировать цифровой двойник дробилки, который в дальнейшем использовался для проведения расчетов на прочность при помощи метода конечных элементов в CAD/CAM/CAE–системе NX узла дробящего конуса, которые позволили подобрать рациональные режимы работы конусной дробилки для измельчения горных пород и полезных ископаемых. На основе всех расчетов была создана параметризированная модель брони конуса, параметры которой варьируются в зависимости значения заданного угла захвата.

Ключевые слова: дробление, горная промышленность, цифровой двойник, конусная дробилка, CAD/CAM/CAE-система NX, математическая модель, расчетная схема, идеализация, симуляция, параметризация.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Для цитирования: *Анциферов С. И., Сычев Е. А., Карачевцева А. В., Обернихин А. А.* Усовершенствованная конструкция брони подвижного конуса в конусной дробилке для горнорудной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12–2. — С. 17—33. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_17.

© С. И. Анциферов, Е. А. Сычев, А. В. Карачевцева, А. А. Обернихин. 2022

Advanced design of moveble cone armor in cone crusher for mining industry

S. I. Anciferov[1], E. A. Sychev[1], A. V. Karachevceva[1], A. A. Obernikhin[1]

[1] Belgorod State Technological University named after. V. G. Shukhova, Belgorod, Russia

Abstract: This article describes a schematic diagram of a secondary cone crusher that is used in mining enterprises and ways to increase the efficiency of the grinding process by modernizing the armor of the crushing cone. The basis for the development of a mathematical model was the digital twin of a medium crushing cone crusher with an upgradeable crushing cone armor design, developed in the NX CAD/CAM/CAE system. This modernization of the design of the armor of the crushing cone is aimed at increasing the angle of capture of the machine and increasing productivity by reducing the amount of premature loss of large pieces from the working chamber of the crusher. When material enters the working area of the crusher, most often the flaky-shaped material falls into the discharge opening. Modernization of the armor of the crushing cone makes it possible to contain it due to a heel-shaped protrusion at the base of the cone, and an increase in the grip angle allows increasing the volume of the working chamber of the cone crusher. Basic mathematical calculations of the gripping angle made it possible to design a digital twin of the crusher, which was later used to carry out strength calculations using the finite element method in the CAD / CAM / CAE-system NX of the crushing cone assembly, which made it possible to select rational modes of operation of the cone crusher for crushing of rocks and minerals. Based on all calculations, a parameterized cone armor model was created, the parameters of which vary depending on the value of the specified capture angle.

Key words: Crushing, mining, digital twin, cone crusher, NX CAD/CAM/CAE system, mathematical model, design model, idealization, simulation, parameterization.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the implementation of the federal university support program «Priority 2030» using equipment based on the Center for High Technologies of V. G. Shukhov BSTU.

For citation: Anciferov S. I., Sychev E. A., Karachevceva A. V., Obernikhin A. A. Advanced design of moveble cone armor in cone crusher for mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):17–33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_17.

1. Введение

В современном мире горнодобывающая промышленность оказывает высокое влияние на технические и экономические показатели страны [1]. С каждым годом становится все труднее добывать полезные ископаемые из недр земли [2,3]. Все экономические затраты увеличиваются из-за роста затрат на содержание рабочей силы и на покупку энергоносителей и нового оборудования. Для того чтобы получить экономически устойчивую отрасль с высокими темпами экономического роста, необходимо внедрять современные технологии [4]. На сегодняшний день широко распространено применение искусственного интеллекта и систем автоматизированного проектирования. Эти направления можно эффективно использовать для усовершенствования процесса добычи полезных ископаемых. Все это играет важную роль в формировании горнодобывающей промышленности [5, 6].

Применение конусных дробилок в горнодобывающей промышленности обусловлено высокой продуктивностью и непрерывностью при процессе

измельчения, а также возможностью работать при полностью заполненной рабочей камере. Еще одним из основных преимуществ данной машины является отсутствие холостого хода в работе, таким образом, машина выполняет свою функцию постоянно, в отличие от щековых дробилок, у которых он присутствует [7].

Также известно, что данные машины обладают и некоторыми недостатками, такими как сложность конструкции, дорогой ремонт комплектующих, просыпание при работе небольшого или лещадного материала.

Процесс дробления в конусной дробилке происходит при помощи раздавливания и частичного изгиба материала между подвижным и неподвижным конусами внутри рабочей камеры дробилки. Максимальный размер куска материала, подвергающийся дроблению, может достигать от 100 до 1500 мм, в зависимости от классификации конусной дробилки [8].

Данные машины, как и любые другие, имеют свою классификацию по крупности материала — мелкое, среднее и крупное. Измельчению в данной машине может подвергаться материал любого типа: рудные породы, со слоистым и плитчатым строением куска, черные и цветные металлы [9].

В настоящее время ведется разработка путей по упрощению конструкции машины, автоматизации процесса дробления, увеличению срока службы рабочих органов и улучшению качества готовой продукции.

2. Материал и методы исследования

Цифровой двойник конусной дробилки КСД — 900 состоит из следующих основных узлов (рис. 1): станины *1*, на которой в нижней части

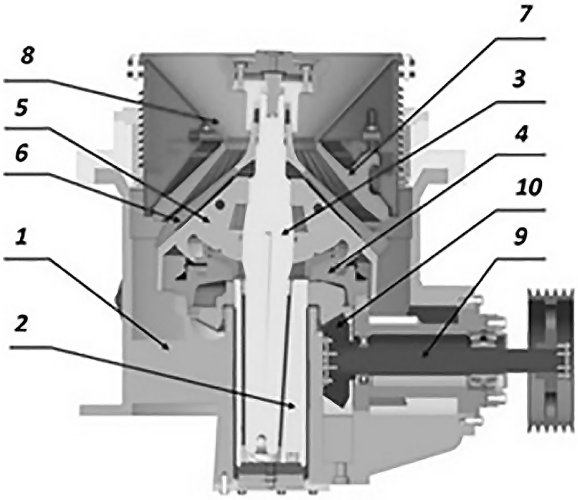

Рис. 1. Схема конусной дробилки: 1 — станина; *2* — эксцентриковый узел; *3* — эксцентриковый вал; *4* — сферический подпятник; *5* — дробящий конус; *6* — броня конуса; *7* — неподвижный конус; *8* — загрузочное отверстие; *9* — приводной вал; *10* — коническая зубчатая передача
Fig. 1. Scheme of a cone crusher: 1 — frame; *2* — eccentric knot; *3* — eccentric shaft; *4* — spherical thrust bearing; *5* — crushing cone; *6* — cone armor; *7* — fixed cone; *8* — loading hole; *9* — drive shaft; *10* — bevel gear

установлен эксцентриковый узел *2*, в нем жестко закреплен эксцентриковый вал *3*. Также в нижней части станины *1* лежит сферический подпятник *4*, который смазывает при работе жестко закрепленный дробящий конус *5*. На дробящем конусе *5* лежит броня конуса *6*. В верхней части станины закреплен неподвижный конус 7. Материал для дробления поступает в рабочую область машины через загрузочное отверстие *8*. Приводом дробилки является электродвигатель, который приводит в действие шнек и приводной вал *9*. На конце приводного вала находится коническая зубчатая передача *10*, которая приводит в действие эксцентриковый узел *2*.

С целью исследования процесса измельчения и прочностных характеристик был использован цифровой двойник узла подвижного конуса с усовершенствованной конструкцией брони конуса, используемой для дробления рудного материала в горной промышленности, которая, в свою очередь,

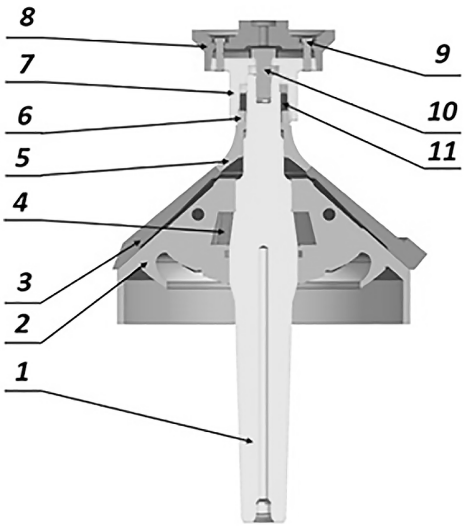

Рис. 2. Цифровой двойник усовершенствованного узла подвижного конуса
Fig. 2. A digital twin of the advanced moving cone assembly

оснащена дополнительным выступом у основания конуса брони. Цифровая модель конуса была разработана в CAD/CAM/CAE-системе NX.

Цифровой двойник узла подвижного конуса конусной дробилки КСД (рис. 2) состоит из вала *1*, соединенного с несущим конусом *2*, который соединен с усовершенствованной броней *3*. Внутри несущего конуса *2* установлен дебалансир *4* для обеспечения дополнительной вибрации, способствующей повышению качества дробления. Кожух дробящий *5* устанавливается на броню конуса *3*. На дробящий кожух устанавливается клиновой сектор *6*, который соединяется со стаканом *7* в верхней части узла. Тарелка *8* соединяется со стаканом *7* между собой при помощи четырех болтов *9*. В отверстие вала *1* вкручивается болт *10*, который жестко соединяет стакан и вал между собой. Материал, попадающий в рабочую область, подвергается механическим сжимающим усилиям на «узкой» стороне и разгружается на «широкой» стороне. Кольцеобразный выступ у основания конуса *11* будет препятствовать выгрузке крупных частиц и частиц лещадной формы из рабочего пространства.

Крупный материал различных форм под действием силы тяжести продвигается к разгрузочному отверстию, а наклонный выступ у основания брони конуса препятствует его выпадению из рабочей зоны. Таким образом, устраняется выгрузка крупных частиц лещадной формы из рабочего пространства и повышается энергетическая эффективность за счет повышения степени загрузки рабочего пространства дробилки. В основе проектирования цифрового объекта лежат конструктивно-технологические, механические, кинематические, математические формы, описывающие свойства материалов и взаимодействие объектов

между собой [10]. Создание цифровой формы изделия дает возможность работать с продуктом в электронном виде, что позволит на практике применять различные технологии объектов и визуализировать бизнес-процессы компании [11, 12].

3. Результаты исследований

Для обоснования использования модернизируемой брони необходимо провести соответствующие расчеты. Первым расчетом будет расчет угла захвата машины. Во втором расчете проверим на прочность наш модернизируемый узел дробящего конуса [13–15].

Перед тем как приступить к расчету угла захвата, необходимо дать определение угла захвата.

Углом захвата конусных дробилок называется угол α между подвижным и неподвижным конусами. Данный угол изменяется в зависимости от положения неподвижного конуса относительно подвижного. А расстояние между подвижным и неподвижным конусами и есть ширина выходной щели.

Из этого следует простой вывод, что изменение данного значения ширины выходной щели приведет к изменению значения угла захвата.

Необходимо помнить, что увеличение угла захвата увеличит и степень дробления, но в то же время значительно снизит производительность дробилки. Данное увеличение угла приведет к предельным значениям угла захвата, при котором возникающая сила трения между куском материала и одним из конусов полностью уравновесится, что приведет к преждевременной выгрузке неготового продукта из рабочей камеры дробилки.

В конусных дробилках значение угла захвата берется несколько больше, чем в щековых. Опыт показывает, что на отечественных и зарубежных изготавливаемых крутоконусных дробилках угол захвата составляет 23–25°.

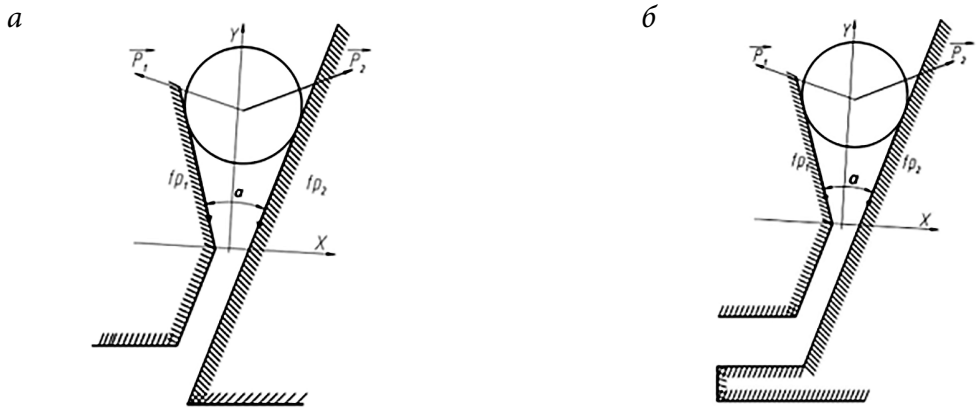

Рис. 3. Расчетная схема угла захвата конусной дробилки: а — до модернизации; б — с применением модернизации: P_1 — реакция неподвижного конуса, Н; P_2 — реакция подвижного конуса, Н; fP_1 — сила трения куска по подвижному конусу, Н; fP_2 — сила трения куска по неподвижному конусу, Н; *a* — угол захвата в конусной дробилке, град; *x, y* — оси

Fig. 3. Calculation scheme of the capture angle of a cone crusher: a — before modernization; *b* — with the use of modernization: P_1 — the reaction of a fixed cone, N; P_2 — the reaction of the moving cone, N; fP_1 — the friction force of the piece along the movable cone, N; fP_2 — the force of friction of a piece along a fixed cone, N; *a* — the grip angle in the cone crusher, degree; *x, y* — the axes

Условия равновесия куска дробимого материала в конусной дробилке схож со щековыми. Таким образом, мы можем сделать вывод, что угол захвата в конусной дробилке не может быть больше двойного угла трения $\alpha \le 2\phi$. В некоторых случаях угол захвата в конусных дробилках может составлять от 24 до 28°.

Для анализа результатов необходимо рассчитать несколько случаев угла захвата материала. В первом случае до применения модернизации на броню конуса, а во втором — после применения модернизации.

Рассмотрим равновесие зажатого куска материала между не модернизируемой броней подвижного и неподвижного конусов в рабочей области конусной дробилки. Расчетная схема угла захвата до модернизации брони конуса представлена на рис. 3, а.

$$\sum x = -P\cos\frac{\alpha}{2} + P_1\cos\frac{\alpha}{2} - $$
$$-fP\sin\frac{\alpha}{2} + fP\sin\frac{\alpha}{2} = 0; \qquad (1)$$

где P — давление подвижного конуса, Н; P_1 — реакция неподвижного конуса, Н; fP_1 — сила трения куска по подвижному конусу, Н; f — коэффициент трения скольжения между куском и металлом конусов; a — угол захвата в конусной дробилке, град; x — ось.

$$P_1\left(\cos\frac{\alpha}{2} + f\sin\frac{\alpha}{2}\right) =$$
$$= P\left(\cos\frac{\alpha}{2} + \sin\frac{\alpha}{2}\right); \qquad (2)$$
$$P = P_1$$

$$\sum y = P_1\ \sin\frac{\alpha}{2} + P\sin\frac{\alpha}{2} - $$
$$-fP_1\cos\frac{\alpha}{2} - fP\cos\frac{\alpha}{2} = 0; \qquad (3)$$

$$2\sin\frac{\alpha}{2} = 2f\cos\frac{\alpha}{2}; \qquad (4)$$

$$tg\frac{\alpha}{2} = f; \qquad (5)$$

$$f = tg\phi; \qquad (6)$$

$$\alpha < 2\phi, \qquad (7)$$

где f — коэффициент трения камня по стали, f = 0,3; j — угол трения, град; y — ось.

$$tg\frac{\alpha}{2} = 0,3,\ \ tg\phi = 0,3\ ,\ \phi = 16^\circ\ ,\ \alpha < 2\phi\ .$$

Практический угол захвата $\alpha_{пр}$, определяется из соотношения:

$$\alpha_{пр} = 0,7 \cdot \alpha; \qquad (8)$$

$$\alpha_{пр} = 0,7 \cdot 30 = 21^\circ,$$

где $a_{пр}$ — практический угол захвата, град.

Рассчитаем угол захвата конусной дробилки с примененной модернизацией на броню конуса. Расчетная схема угла захвата с примененной модернизацией представлена на рис. 3, *б*.

$$\sum x = -P\cos\frac{\alpha}{2} + P_1\cos\frac{\alpha}{2} - $$
$$-fP\sin\frac{\alpha}{2} + fP\sin\frac{\alpha}{2} = 0; \qquad (9)$$

где f — коэффициент трения скольжения между куском и металлом конусов.

$$P_1\left(\cos\frac{\alpha}{2} + f\sin\frac{\alpha}{2}\right) =$$
$$= P\left(\cos\frac{\alpha}{2} + \sin\frac{\alpha}{2}\right); \qquad (10)$$

$$P = P_1;$$

$$\sum y = P_1\sin\frac{\alpha}{2} + P\sin\frac{\alpha}{2} - $$
$$-fP_1\cos\frac{\alpha}{2} - fP\cos\frac{\alpha}{2} = 0; \qquad (11)$$

$$2\sin\frac{\alpha}{2} = 2f\cos\frac{\alpha}{2}; \quad (12)$$

$$tg\frac{\alpha}{2} = f; \quad (13)$$

$$f = tg\phi; \quad (14)$$

$$\alpha < 2\phi. \quad (15)$$

где f — коэффициент трения камня по стали, f = 0,3.

$$tg\frac{\alpha}{2} = 0,3, \quad (16)$$

$$tg\phi = 0,3, \ \ \phi = 16^{\circ}, \ \ \alpha < 2\phi, \ \ \alpha = 33^{\circ}.$$

Практический угол захвата $\alpha_{пр}$, определяется из соотношения:

$$\alpha_{пр} = 0,7 \cdot \alpha; \quad (17)$$

$$\alpha_{пр} = 0,7 \cdot 33 = 23,1^{\circ}.$$

где $a_{пр}$ — практический угол захвата, град.

Проанализировав полученные результаты расчета угла захвата до модернизации брони конуса и после, можно сделать вывод, что применение модернизации позволило увеличить угол между броней подвижного и конуса на 2°. Таким образом, основываясь на пользе модернизации, установка выступа в нижней части конуса позволит предотвратить преждевременный выход крупного материала.

Следующим этапом является проверка узла на прочность [16, 17].

Для определения прочности узла дробящего конуса используется CAD/CAM/CAE-система NX, позволяющая инженеру-конструктору проводить инженерный расчет методом конечных элементов. За счет этого данный метод получил широкое распространение в механике для определения напряжений и деформаций.

Перед проведением расчета была разработана расчетная схема модернизируемого узла дробящего конуса с выступом (рис. 4), который будет препятствовать выпадению из рабочего пространства крупных частиц.

Опишем основные этапы при проведении данного расчета:

1. создание расчетной схемы, на которой указывают информацию о нагрузках, действующих на узел подвижного конуса;

2. подготовка геометрии модели, основываясь на расчетной схеме;

3. создание КЭ сетки для деталей узла дробящего конуса, входящих в расчет;

4. создание файла симуляции, в котором указываются ограничения и нагрузки, исходя из расчетной схемы;

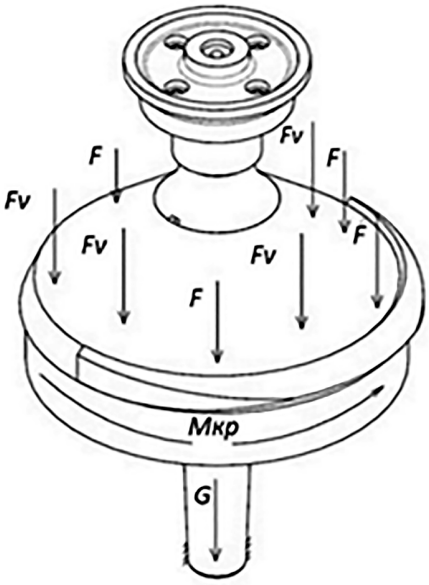

Рис. 4. Расчетная схема узла подвижного конуса конусной дробилки: F — нагрузка веса конструкции, опирающейся на узел дробящего конуса; F_v — нагрузка веса материала на броню конуса; $M_{кр}$ — крутящий момент; G — собственный вес узла дробящего конуса

Fig. 4. Scheme of the movable cone assembly of a cone crusher: F — the weight load of the structure resting on the crushing cone assembly; F_v –the material weight load on the cone armor; $M_{кр}$ — torque; G — the own weight of the crushing cone assembly

5. анализ полученных результатов, исходя из диаграмм перемещений и напряжений.

На первом этапе необходимо выполнить сбор информации о нагрузках, действующих на броню подвижного конуса [10, 11].

На втором этапе расчета необходимо составить расчетную схему. Здесь необходимо показать соответствующие нагрузки и граничные условия. На основе расчетной схемы далее создается модель симуляции, конечным результатом которой будет решение системы уравнений. Результатом решения будет описание поведения модели при различных условиях ее эксплуатации, т. е. при заданных воздействиях и ограничениях [12, 18].

В данном расчете были приняты следующие внешние нагрузки (табл. 1): нагрузка веса конструкции, опирающейся на узел дробящего конуса F = 1568 *Н*; нагрузка веса материала на броню конуса F_v = 2081 *Н*; сила крутящего момента $M_{кр}$ = 723 *Н×М*; нагрузка собственного веса узла конуса, дробящего G = 12515,5 *Н*.

После определения значения внешних нагрузок на узел подвижного конуса конусной дробилки необходимо подготовить расчетную модель. На этом этапе инженер-конструктор выполняет идеализацию геометрии модели узла подвижного конуса.

Идеализация геометрии заключается в удалении неконструктивных элементов на модели или их замене, не оказывающих существенного влияния на финальный результат расчета. Завершающим этапом идеализации геометрии узла подвижного конуса будет удаление фасок, скруглений и неконструктивных отверстий. Данные действия значительно уменьшают нагрузку на расчетную машину, позволяя производить расчет гораздо быстрее.

Система NX позволяет проводить все действия, связанные с идеализацией геометрии подвижного конуса на ассоциативной копии мастер-модели — идеализация геометрии, что позволит инженеру-конструктору изменять параметры идеализации с целью изменения конечного результата. Перед началом идеализации геометрии выполняется команда «Перенос». Затем в идеализации геометрии чаще всего удаляются скругления, фаски и неконструктивные отверстия, которые не влияют на конечный результат расчета.

Следующим этапом необходимо задать физические свойства на основе свойств материала. Это необходимо для создания коллектора сеток. Физические свойства материалов приведены в табл. 2.

После задания нагрузок на каждую расчетную деталь КЭ сетки (рис. 5) выполним расчет симуляции в приложении для расчета NX. Перед выполнением симуляции в NX Nastran добавим все расчетные детали в КЭ сборку.

Таблица 1
Значения внешних нагрузок
Values of external loads

№ п/п	Наименование	Обозначение	Значение
1	Собственный вес узла дробящего конуса	G	12515,5 *Н*
2	Нагрузка веса конструкции, опирающейся на узел дробящего конуса	F	1568 *Н*
3	Крутящий момент	$M_{кр}$	723 *Н×м*
4	Нагрузка веса материала на броню конуса	F_v	2081 *Н*

Таблица 2

Физические свойства материалов для расчетных деталей

Physical Properties of Materials for Analysis Parts

№ п/п	Наименование детали	Материал	Характеристики материала
1	Вал	Сталь 40Х ГОСТ-4543-71	Плотность ρ = 7820 кг/м^3 Модуль упругости E = 2,14·10^5 МПа Предел прочности при растяжении $\sigma_в$ = 652 МПа Предел текучести σ_T =330-800 МПа Твердость НВ 260 — 280
2	Броня конуса	Сталь 110Г13ГЛ ГОСТ 2176-77	Плотность ρ = 7820 кг/м^3 Модуль упругости Е = 2·10^5 МПа Предел прочности при растяжении $\sigma_в$ = 800 — 900 МПа Предел текучести σ_T = 310-350 МПа Твердость НВ 600
3	Конус несущий	Отливка 35ГЛ ГОСТ 977-88	Плотность ρ = 7820 кг/м^3 Модуль упругости E = 2,14·10^5 МПа Предел прочности при растяжении $\sigma_в$ = 540 МПа Предел текучести σ_T = 294-343 МПа Твердость НВ 260 — 280

После добавления расчетных деталей в формате «Assyfem» они будут иметь ограничение сборочных связей. Завершающим этапом этого шага является запуск расчетного модуля NX «Nastran».

Последующим шагом будет задание на расчетный узел подвижного конуса нагрузок в приложении NX «Расширенная симуляция». Этот этап является очень важным, так как от задания нагрузок будет зависеть конечный результат нашего расчета.

Зададим определенные нагрузки на расчетные детали, опираясь на нашу ранее созданную расчетную схему.

Приложим внешние нагрузки исходя из данных табл. 1: нагрузка веса конструкции, опирающейся на узел дробящего конуса F = 1568 *Н;* нагрузка веса материала на броню конуса F_v = 2081 *Н*; сила крутящего момента $M_{кр}$ = 723 *Н× м*; нагрузка собственного веса узла конуса дробящего G = 12515,5 *Н*.

Результат создания модели симуляции с заданными нагрузками по расчетной модели представлен на рис. 6.

Итоговой целью расчетов является определение в расчетной модели узла дробящего конуса максимальных перемещений и напряжений.

После анализа конечного результата выполненного расчета внешних нагрузок нами была получена симуляция модели узла дробящего конуса со шкалой значений максимальных напряжений и перемещений в двух положениях (рис. 7).

Перед проведением анализа полученных результатов расчета выполним математическую проверку на условия прочности и жесткости. Для этого необходимо сравнить полученные значения максимально допустимых перемещений и напряжений. Последним этапом проверки будет расчет коэффициент запаса прочности для узла подвижного конуса, который будет удовлетворять допустимым значениям.

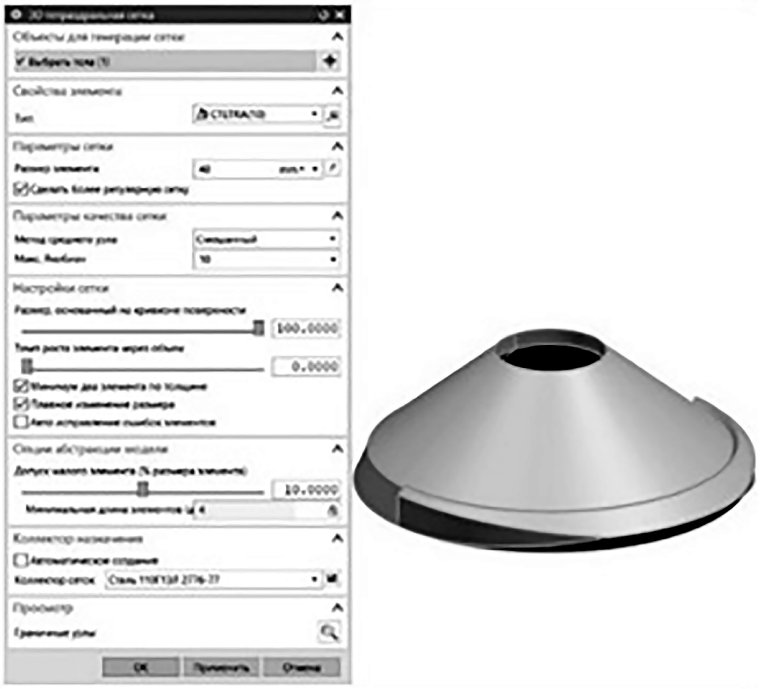

Рис. 5. Создание сетки конечных элементов
Fig. 5. Create a finite element mesh

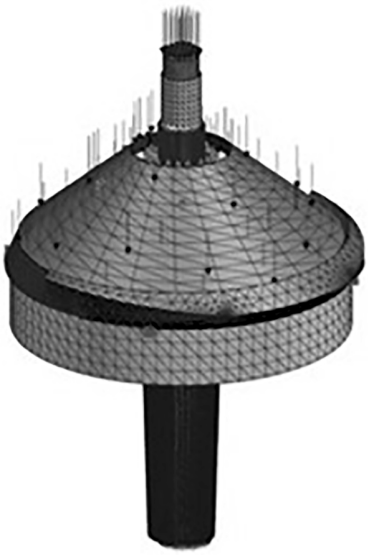

Рис. 6. Итоговый результат приложения внешних нагрузок
Fig. 6. The final result of the application of external loads

Проанализировав полученные результаты расчета, можно сделать вывод, что максимальные напряжения будут возникать на грани выступа конуса. Рассчитаем условия прочности для брони конуса по формуле (18) [18, 19]:

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max}} \geq [n], \qquad (18)$$

где n — коэффициент запаса прочности; $[\sigma]$ — допускаемые напряжения для выбранного материала, МПа; σ_{max} — максимальные расчетные напряжения, МПа; $[n]$ — допускаемый коэффициент запаса прочности, $[n] = 5$.

$$n = \frac{400}{2{,}046} \geq 5;$$

$$n = 195{,}5 \geq 5.$$

Таким образом, условие прочности выполняется.

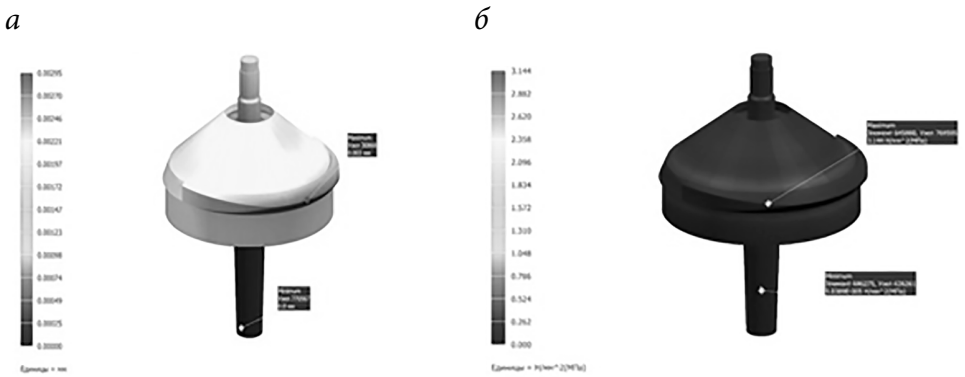

Рис. 7. Результаты расчета: а — перемещений; б — напряжений
Fig. 7. Calculation results: a — displacements; b — stress

Проверим условие жесткости для брони конуса.

Условия жесткости — это сравнение максимальных перемещений с допускаемыми.

$$\delta_{\max} \le [\delta], \qquad (19)$$

где δ_{max} — максимальные расчетные перемещения, мм; $[\delta]$ — допускаемые перемещения, мм.

$$[\delta] = \frac{1}{250} \times a, \qquad (20)$$

где a — максимальный габаритный размер, a = 970 мм; δ — допускаемые расчетные перемещения, мм.

$$[\delta] = \frac{1}{250} \times 970;$$
$$3{,}88 \le 6{,}08.$$

δ — допускаемые расчетные перемещения, мм.

Таким образом, условие жесткости выполняется.

Результаты расчета напряжений и перемещений приведены в табл. 3, 4.

Изменение параметров геометрии брони подвижного конуса приведет к изменению геометрии брони неподвижного конуса, так как они были связаны между собой. Формула расчета угла захвата была применена при параметризации брони подвижного конуса, что позволило варьировать параметры, основываясь на предельно допустимых требованиях.

При изменении значения параметров параметризации геометрии изменится геометрия модели. Значения исходной модели и параметров брони подвижного и неподвижного конусов до модернизации представлены на рис. 8.

Значения параметров модели брони подвижного и неподвижного конусов после модернизации представлены на (рис. 9).

На рис. 10 показана геометрия до модернизации, где угол захвата, и после модернизации, где угол захвата.

Выводы

В ходе работы рассмотрена конструкция конусной дробилки среднего дробления, используемой при измельчении руды на предприятиях горной промышленности. Подробно рассмотрена конструкция цифрового двойника узла дробящего конуса с модернизацией брони подвижного

Таблица 3
Результаты расчета напряжений
Results of stress calculation

№ п/п	Название детали	Материал	Максимальные напряжения, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Коэффициент запаса прочности
1	Вал	Сталь 40Х ГОСТ-4543-71	3,144	280	89
2	Броня конуса	Сталь 110Г13ГЛ ГОСТ 2176-77	2,046	400	195,5
3	Конус несущий	Отливка 35ГЛ ГОСТ 977-88	0,847	294	347,1

Таблица 4
Результаты расчета перемещений
Displacement calculation results

№ п/п	Название детали	Материал	Максимальные перемещения, МПа	Допускаемые перемещения, МПа	Коэффициент запаса прочности
1	Вал	Сталь 40Х ГОСТ-4543-71	0,00106	5,74	89
2	Броня конуса	Сталь 110Г13ГЛ ГОСТ 2176-77	0,00295	3,88	195,5
3	Конус несущий	Отливка 35ГЛ ГОСТ 977-88	0,00267	3,6	347,1

конуса путем установки у основания конуса каблучкообразного выступа, препятствующего преждевременному выпадению материала крупной и лещадной формы до начала дробления. Основываясь на базовом расчете угла захвата конусных дробилок, был разработан цифровой двойник конус-

а

Подробности

Параметр	Значение	Выражение
Горизонтальный разме...	155.0000[мм]	p6=310/2
Горизонтальный разме...	450.0000[мм]	p7=450
Вертикальный размер ...	245.0000[мм]	p8=330-85
Вертикальный размер ...	330.0000[мм]	p9=330
Горизонтальный разме...	485.0000[мм]	p10=970/2
Горизонтальный разме...	465.0000[мм]	p11=930/2
Паралельный размер ...	90.0000[мм]	p12=90
Угловой размер между...	42.0000[градусы]	p13=42
Перпендикулярный ра...	8.0000[мм]	p14=8
Угловой размер между...	45.0000[градусы]	p15=45
Горизонтальный разме...	137.5000[мм]	p16=275/2
Угловой размер между...	30.0000[градусы]	p17=30
Угловой размер между...	21.0000[градусы]	p18=p17*0.7

б

Подробности

Параметр	Значение	Выражение
Паралельный размер ...	472.5000[мм]	p0=945/2
Паралельный размер ...	57.0000[мм]	p2=57
Паралельный размер ...	100.0000[мм]	p3=100
Угловой размер между...	30.0000[градусы]	p4=30
Паралельный размер ...	70.0000[мм]	p5=70
Угловой размер между...	40.0000[градусы]	p6=40
Угловой размер между...	48.0000[градусы]	p7=48
Вертикальный размер ...	315.0000[мм]	p9=315
Горизонтальный разме...	195.0000[мм]	p10=390/2
Горизонтальный разме...	215.0000[мм]	p11=430/2
Паралельный размер ...	11.0000[мм]	p12=11
Размер радиуса для Arc1	30.0000[мм]	p13=30
Перпендикулярный ра...	20.0000[мм]	p14=20
Горизонтальный разме...	505.0000[мм]	p15=505

Рис. 8. Параметры геометрии (до модернизации): а — брони подвижного конуса; *б* — брони неподвижного конуса.
Fig. 8. Geometry parameters (before modernization): a — moving cone armor; *b* — armor of a fixed cone.

а

Подробности

Параметр	Значение	Выражение
Горизонтальный разме...	155.0000[мм]	p6=310/2
Горизонтальный разме...	450.0000[мм]	p7=450
Вертикальный размер ...	245.0000[мм]	p8=330-85
Вертикальный размер ...	330.0000[мм]	p9=330
Горизонтальный разме...	485.0000[мм]	p10=970/2
Горизонтальный разме...	465.0000[мм]	p11=930/2
Паралельный размер ...	90.0000[мм]	p12=90
Угловой размер между...	42.0000[градусы]	p13=42
Перпендикулярный ра...	8.0000[мм]	p14=8
Угловой размер между...	45.0000[градусы]	p15=45
Горизонтальный разме...	137.5000[мм]	p16=275/2
Угловой размер между...	33.0000[градусы]	p17=33
Угловой размер между...	23.1000[градусы]	p18=p17*0.7

б

Подробности

Параметр	Значение	Выражение
Паралельный размер ...	472.5000[мм]	p0=945/2
Паралельный размер ...	53.0000[мм]	p2=53
Паралельный размер ...	100.0000[мм]	p3=100
Угловой размер между...	33.0000[градусы]	p4=33
Паралельный размер ...	70.0000[мм]	p5=70
Угловой размер между...	40.0000[градусы]	p6=40
Угловой размер между...	48.0000[градусы]	p7=48
Вертикальный размер ...	315.0000[мм]	p8=315
Горизонтальный разме...	195.0000[мм]	p10=390/2
Горизонтальный разме...	215.0000[мм]	p11=430/2
Паралельный размер ...	11.0000[мм]	p12=11
Размер радиуса для Arc1	30.0000[мм]	p13=30
Перпендикулярный ра...	20.0000[мм]	p14=20
Горизонтальный разме...	505.0000[мм]	p15=505

Рис. 9. Параметры геометрии (после модернизации): а — брони подвижного конуса; *б —* брони неподвижного конуса

Fig. 9. Geometry parameters (after modernization): a — moving cone armor; *b —* armor of a fixed cone

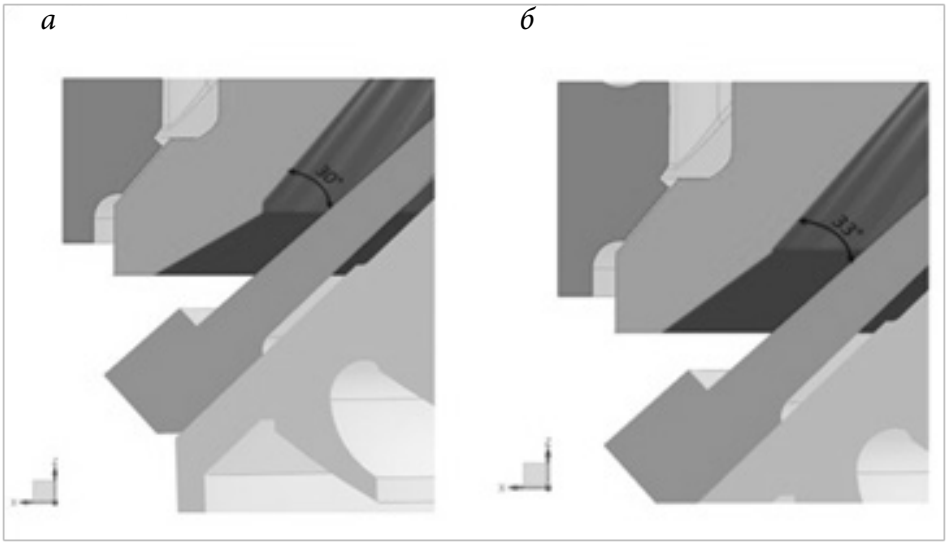

Рис. 10. Геометрия: а — до модернизации; *б —* после модернизации

Fig. 10. Geometry: a — before modernization; *b —* after modernization

ной дробилки с модернизацией брони дробящего конуса. В последующем была создана расчетная модель узла дробящего конуса, расчет на прочность которой показал, что примененная модернизация соответствует требованиям коэффициента запаса прочности. Проанализировав расчет угла захвата до модернизации и после, мы создали параметризированную модель брони конуса, геометрию которой можно изменить при помощи изменения значений параметров. Также полученные нами математические выражения приводят к увеличению объема рабочей камеры за счет увеличения угла захвата конусной дробилки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Яковлев В. Л.*, *Корнилков С. В.*, *Соколов И. В.* Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья. — Екатеринбург: УрО РАН,2018. — 360 с.

2. *Пикалов В. А.*, *Лапаев В. Н.*, *Савельев О. Ю.* Особенности проектирования высокопроизводительных карьеров // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2016. — №3. — С. 392—395.

3. *Чендырев М. А.*, *Журавлев А. Г.* Рационализация геометрических параметров приемных бункеров конусных дробилоккрупного дробления при автомобильном транспорте // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-1. — С. 158—170. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_158.

4. *Житка Лаура Влцкова.* Анализ состояния профессиональной безопасности в отрасли подземного строительства Чехии и за рубежом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4–1. – С. 91—97. DOI:10.25018/0236_1493_2021_41_0_91.

5. *Болобов В. И.*, *Плащинский В. А.* Влияние продолжительности удара на эффективность разрушения горных пород и пластического деформирования металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 3. — С. 78—96. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_78.

6. *Белов Н. В.*, *Бородина М. Б.*, *Смирнова О. А.*, *Часовских А. С.* Анализ отказов элементов конусных дробилок и причин их возникновения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 3. — С. 17—27. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_3_0_17_27.

7. *Деревнин И. А.*, *Бабокин Г. И.* Оценка энергоэффективности трехстадийного процесса дробления конусными дробилками // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2021. — Вып. 12. — С. 39–43. DOI: 10.24412/2071_6168_2021_12_39_43.

8. *Горлов И. В.*, *Митусов П. Е.*, *Беляев А. М.* Анализ процесса измельчения слабых горных пород // Уголь. — 2022. –№ 6. — С. 44—47. DOI: 10.18796/0041_5790_2022_6_44_47.

9. *Бухаринов Е. И.*, Выбор дробилки // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet». — 2020. — №11 С. 1—6.

10. *Zakoldaev D. A.*, *Korobeynikov A. G.*, *Shukalov A. V.*, *Zharinov I. O.* Digital forms of describing Industry 4.0 objects. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2019. vol. 656 (1). pp. 1–6. DOI:10.1088/1757–899X/656/1/012057.

11. *Zakoldaev D. A.*, *Shukalov A. V.*, *Zharinov I. O.*, *Zharinov O. O.* Designing technologies for the interaction of cyber-physical systems in smart factories of the Industry 4.0. Journal of Physics Conference Series. 2020. vol. 1515 (2). pp. 1–6. DOI:10.1088/1742–6596/1515/2/022008.

12. *Zakoldaev D. A.*, *Shukalov A. V.*, *Zharinov I. O.*, *Zharinov O. O.* Realization of project procedures in the item designing companies of the Industry 3.0 and Industry 4.0. Journal of Physics: Conference Series. 2019. vol. 1333 (7). pp. 1–6. DOI:10.1088/1742–6596/1333/7/072030.

13. *Бочков В. С.*, *Дягилев С. Д.* Анализ одностадийного и двухстадийного дробления сланца в щековой дробилке ЩД 10М для изготовления бетонно-мозаичной плитки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 7. — С. 78—84. DOI: 10.25018/0236_1493_2020_7_0_78_84.

14. *Богданов В. С.*, *Василенко О. С.*, *Богданов Д. В.*, *Фадин Ю. М.* Расчет производительности конусной инерционной дробилки // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2017. — № 5. — С. 77–81. DOI: 10.12737/article_590878faf21b78.45764369.

15. *Гурьянов Г. А.*, *Абдеев Б. М.*, *Байгереев С. Р.*, *Ким В. А.*, *Сулейменов А. Д.* Прикладная механико-математическая модель измельчения частицы твердого вещества статическим раздавливанием // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2021. — № 3. — С. 58—69. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.3.06

16. *Gao Yinping, Chang Daofang, Chun-Hsien Chen, Xu Zhenyu Xu.* Design of digital twin applications in automated storage yard scheduling // Advanced Engineering Informatics. 2022. No 51. pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101477.

17. *Xuesong Xu, Gang Xiao, Gonghui Lou, Jiawei Lu, Jun Yang, Zhenbo Cheng.* Flexible parametric FEA modeling for product family based on script fragment grammar // Computers in Industry. 2019. No. 111. pp. 15–25. https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.06.003.

18. *Богданов В. С.*, *Дмитриенко В. Г.*, *Шеметов Е. Г.* Использование в учебном процессе CAD/CAM/CAE системы NX студентами БГТУ им. В. Г. Шухова // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 7. — С. 29—3. DOI: 10.25018/0236_1493_2017_7_0_29_33.

19. *Chiocca A.*, *Frendo F.*, *Aiello F.*, *Bertini L.* Influence of residual stresses on the fatigue life of welded joints. Numerical simulation and experimental tests // International Journal of Fatigue 162. 2022. pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106901. ГИАБ

REFERENCES

1. Yakovlev V. L., Kornilkov S. V., Sokolov I. V. Innovative basis of the strategy for the integrated development of mineral resources. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2018, pp.360. [InRuss].

2. Pikalov V. A., Lapaev V. N., Saveliev O. Yu. Features of designing high-performance quarries. Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources. 2016, no.3, pp. 392—395. [InRuss].

3. Chendyrev M. A., Zhuravlev A. G. Rationalization of geometric parameters receptions bunkers primary gyratory cone crusher for automotive transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5-1):158—170. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_158.

4. Jitka Laura Vlčková Analysis of the state of professional safety in the underground construction industry in the Czech republic and abroad. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(4-1):91—97. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_91.

5. Bolobov V. I., Plashchinskii V. A. Influence of impact duration on the efficiency of destruction of rocks and plastic deformation of metals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(3):78-96. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_78.

6. Belov N.V., Borodina M.B., Smirnova O.A., Chasovskikh A.S. Failure analysis of main components of cone crushers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(3):17-27. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-17-27.

7. Derevnin I. A., Babokin G. I., Evaluation of the energy efficiency of a three-stage crushing process with cone crushers. Izvestiya TulGU. Technical science 2021, vol. 12, pp. 39—43. [InRuss]. DOI: 10.24412/2071_6168_2021_12_39_43.

8. Gorlov I. V., Mitusov P. E., Belyaev A. M. Analysis of the process of grinding weak rocks. Coal. 2022, № 6, pp. 44—47. [InRuss]. DOI: 10.18796/0041_5790_2022_6_44_47.

9. Bukharinov E. I., Choosing a crusher. Scientific and educational journal for students and teachers “StudNet”. 2020, no.11, pp. 1—6. [InRuss].

10. Zakoldaev D. A., Korobeynikov A. G., Shukalov A. V., Zharinov I. O. Digital forms of describing Industry 4.0 objects. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2019, vol. 656 (1), pp. 1–6. DOI:10.1088/1757–899X/656/1/012057.

11. Zakoldaev D. A., Shukalov A. V., Zharinov I. O., Zharinov O. O. Designing technologies for the interaction of cyber-physical systems in smart factories of the Industry 4.0. Journal of Physics Conference Series. 2020, vol. 1515 (2), pp. 1–6. DOI:10.1088/1742−6596/1515/2/022008.

12. Zakoldaev D. A., Shukalov A. V., Zharinov I. O., Zharinov O. O. Realization of project procedures in the item designing companies of the Industry 3.0 and Industry 4.0. Journal of Physics: Conference Series. 2019, vol. 1333 (7), pp. 1–6. DOI:10.1088/1742−6596/1333/7/072030.

13. Bochkov V. S., Dyagilev S. D. Analysis of one-stage and two-stage crushing of slate in the ShchD 10M jaw crusher for the manufacture of concrete mosaic tiles. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 7, pp.78 — 84. [InRuss]. DOI: 10.25018/0236_1493_2020_7_0_78_84.

14. Bogdanov V. S., Vasilenko O. S., Bogdanov D. V., Fadin Yu. M Calculation of the performance of a cone inertial crusher. Vestnik BSTU im. V. G. Shukhov. 2017, no. 5, pp. 77–81. [InRuss] DOI: 10.12737/article_590878faf21b78.45764369.

15. Guryanov G. A., Abdeev B. M., Baigereev S. R., Kim V. A., Suleimenov A. D. Applied mechanical and mathematical model of grinding solid particles by static crushing. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic university. Mechanics. 2021, no. 3, pp. 58 — 69. [InRuss] DOI: 10.15593/perm.mech/2021.3.06.

16. Gao Yinping, Chang Daofang, Chun-Hsien Chen, Xu Zhenyu Xu. Design of digital twin applications in automated storage yard scheduling. Advanced Engineering Informatics. 2022, no. 51, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101477.

17. Xuesong Xu, Gang Xiao, Gonghui Lou, Jiawei Lu, Jun Yang, Zhenbo Cheng. Flexible parametric FEA modeling for product family based on script fragment grammar. Computers in Industry. 2019, no. 111, pp. 15–25. DOI: 10.1016/j.compind.2019.06.003.

18. Bogdanov V. S., Dmitrienko V. G., Shemetov E. G. Use in the educational process of the CAD / CAM / CAE system NX by students of BSTU. V. G. Shukhova. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 7, pp. 29 — 33. [InRuss] DOI: 10.25018/0236_1493_2017_7_0_29_33.

19. Chiocca A., Frendo F., Aiello F., Bertini L. Influence of residual stresses on the fatigue life of welded joints. Numerical simulation and experimental tests. International Journal of Fatigue 162. 2022, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106901.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анциферов Сергей Игоревич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Механическое оборудование», http://orcid.org/0000-0002-4210-3185, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова), 308012, Белгород, улица Костюкова, д. 46, Россия, e-mail: anciferov.sergey@gmail.com;

Сычев Евгений Андреевич — аспирант кафедры «Механическое оборудование», http://orcid.org/0000-0002-9112-1945, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова). Россия,308012, Белгород, улица Костюкова,46, e-mail: evgeniy.sychov.015@gmail.com;

Карачевцева Анастасия Владимировна — аспирант кафедры «Механическое оборудование», http://orcid.org/0000-0002-8656-8443, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова) 308012, Белгород, улица Костюкова, д. 46, Россия, e-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com;

Обернихин Анатолий Александрович — магистр кафедры «Механическое оборудование», http://orcid.org/0000-0002-1746-9177, Белгородский государственный техноло-

гический университет им. В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова). Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова,46, e-mail: obernihin.tolya@mail.ru.
Для контактов: *Анциферов Сергей Игоревич*, e-mail: anciferov.sergey@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anciferov S. I., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mechanical Equipment Department, http://orcid.org/0000-0002-4210-3185, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov), 308012, Belgorod, Kostyukova street,46, Russia, e-mail: anciferov.sergey@gmail.com;
Sychev E. A., postgraduate student kafedry «Mekhanicheskoe oborudovanie», http://orcid.org/0000-0002-9112-1945, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov),308012, Belgorod, 308012, Belgorod, Kostyukova street,46, Russia, e-mail: evgeniy.sychov.015@gmail.com;
Karachevceva A. V., postgraduate student of the Mechanical Equipment Department, http://orcid.org/0000-0002-8656-8443, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov),308012, Belgorod, 308012, Belgorod, Kostyukova street,46, Russia, e-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com;
Obernikhin A. A., master of the department of the Mechanical Equipment Department, http://orcid.org/0000-0002-1746-9177, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov),308012, Belgorod, 308012, Belgorod, Kostyukova street,46, Russia, e-mail: obernihin.tolya@mail.ru.
For contacts: *Anciferov Sergej Igorevich*, e-mail: anciferov.sergey@gmail.com.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.
Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.