

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ И ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ РЕШЕТАЧНОГО СТАВА ЗАБОЙНОГО СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА

Лазарев А.Д., Жуков И.А.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: горно-транспортные машины, уголь, скребковый конвейер, очистной комбайн, анализ прочности, метод конечных элементов.

Аннотация. По результатам анализа литературных источников приводится информация о существующих методах расчета на прочность конструкции решетчатой секции скребкового конвейера. Поэлементно рассматриваются основные узлы, входящие в состав очистного механизированного комплекса, оказывающих влияние на прочностные свойства конструкции конвейера, выявляются их механические и технологические свойства. На основе поэлементного анализа предлагается методология расчета внешних нагрузок, действующих на конвейер с учетом его эксплуатации при подземной добыче угля. Предлагается применение компьютерного моделирования посредством метода суперэлементов в качестве расчетного механизма для оценки напряженно-деформированного состояния решетчатой секции шахтного скребкового конвейера. Поэтапно излагаются подходы к реализации предлагаемой методики с параллельной постановкой новых задач для науки и практики.

METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE DETERMINATION AND ASSESSMENT OF THE STRENGTH OF THE GRATING BLOCK OF A DOWNHOLE SCRAPER CONVEYOR

Lazarev A.D., Zhukov I.A.

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: mining and transport machines, coal, scraper conveyor, cutter-loader, strength analysis, finite element method.

Abstract. Based on the results of the analysis of literary sources, information is provided on existing methods for calculating the structural strength of the grating section of a scraper conveyor. The main components of the cleaning mechanized complex, which affect the strength properties of the conveyor structure, are considered piecemeal, and their mechanical and technological properties are revealed. Based on the piecemeal analysis, a methodology is proposed for calculating the external loads acting on the conveyor, taking into account its operation during underground coal mining. It is proposed to use computer modeling using the superelement method as a calculation mechanism for estimating the stress-strain state of the grating section of a mine scraper conveyor. The approaches to the implementation of the proposed methodology are presented step by step, with parallel formulation of new tasks for science and practice.

Введение

Развитие горнодобывающей отрасли основывается на увеличении производительности за счет внедрения передовых техники и технологий [1]. Достижение этого возможно при наличии широкого перечня современной надёжной техники, обеспечивающей механизацию и автоматизацию большинства технологических процессов.

Горную технику по функциональному назначению разделяют на категории: непосредственно горные машины, используемые для добычи полезных ископаемых и создания горных выработок, горно-транспортные машины [2] и стационарное оборудование. При добыче угля подъемным способом применяется очистной механизированный комплекс, который включает в себя несколько основных единиц оборудования: комбайн [3], секции крепи, забойный скребковый конвейер.

Главная функция скребкового конвейера (рис. 1) – это транспортировка угля и горной массы по участкам забоя. Однако, по сути конвейер является основой шахтного комплекса, обеспечивающей перемещение выемочной машины, взаимосвязь между секцией крепи и вспомогательным оборудованием. На нем устанавливаются рейки для механизма подачи,

желоб для кабелеукладчика, камеры для магистралей шидросистемы, кронштейны для соединения с гидродомкратом передвижки секции крепи. В процессе работы, испытывая высокие нагрузки, элементы скребкового конвейера подвержены частым поломкам и выходам из строя [4].

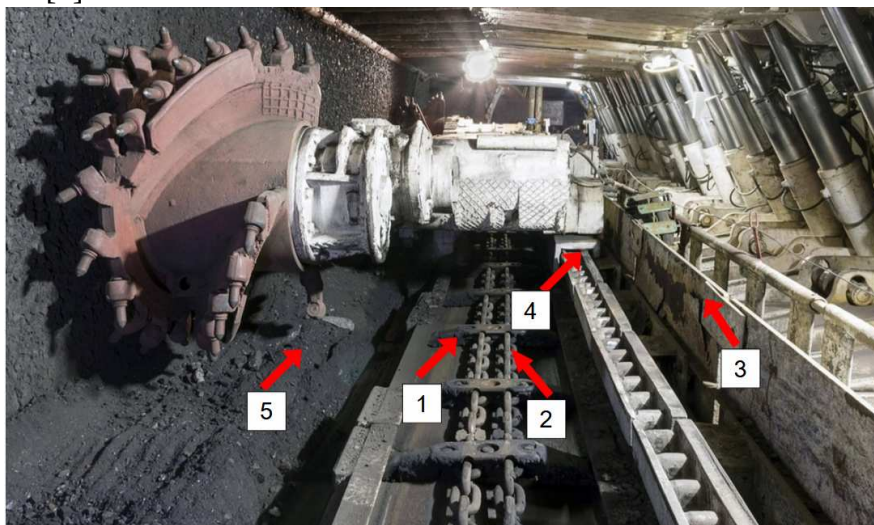


Рис. 1. Структурные элементы скребкового конвейера: 1 – скребок, 2 – цепь, 3 – механизированная крепь, 4 – передвижной комбайн, 5 – угольная порода

Как показывает анализ статистических данных, из всех возможных причин простоя механизированного комплекса остановка работы в связи с выходом из строя конвейера может достигать до 40% (рис. 2).

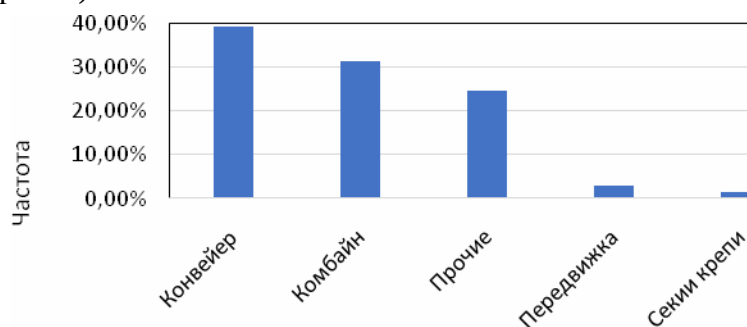


Рис. 2. Причины простоев

При этом, причинами поломок скребковых конвейеров являются чаще всего разрушение рейки механизма подачи, обрыв цепи, разрыв сварных соединений деталей желоба, попадание внутрь конвейера инородных тел, некачественный монтаж [5], абразивный износ и др. Столь высокое значение частоты простоев, связанных с каким-либо ремонтом конвейера [6], свидетельствует о значительности данного фактора в формировании причин остановки работы шахтного оборудования.

Безотказность и ресурс современных скребковых забойных конвейеров должны обеспечиваться прочностью и износостойкостью рештаков и их сменных элементов. Еще на стадии проектирования конвейеров необходимо соблюдение требований прочности, надежности, долговечности и экономичности, что естественно должно сопровождаться теоретическими и экспериментальными исследованиями и совершенствованием по их результатам методов расчета.

Материалы и методы исследования

Оперативному решению практических вопросов, связанных с исследованием и проектированием скребковых конвейеров, препятствует отсутствие систематизированного материала по комплексной оценке прочностных характеристик рештачной секции става конвейера.

В литературных источниках, как классических [2], так и современных, посвященных горно-шахтному транспорту, при изложении основ проектирования конструкции и технических параметров скребкового конвейера [7], приводятся методики расчета производительности [8], мощности привода, длины конвейера, прочности тяговых цепей, габаритных размеров желоба и скребков, либо анализируются технические решения отдельных элементов [9-11].

Единой методики, описывающей порядок расчета на прочность и жесткость секции става, не существует на данный момент, поэтому весьма актуальной представляется задача уточнения и систематизации существующих методов расчёта элементов конструкции скребкового конвейера, выявление комплекса факторов, влияющих на работу секции и вызывающих нарушения в работе скребкового конвейера, и разработка на их основе обобщенного методического подхода, включающего в том числе разработку и внедрение инженерного программного обеспечения.

В работе [12] предложено для поставленной проблемы применять метод конечных элементов (МКЭ) и российскую САЕ систему T-Flex. Апробация предложенного подхода осуществлялась на решетчатой секции конвейера, выпускаемого Анжерским машиностроительным заводом. Однако распространение такого метода анализа прочностных характеристик на всевозможные конструктивных исполнения решетков требует учета ряда следующих моментов.

1. Разработка расчетной модели решётки

Первым этапом является непосредственно разработка 3D-модели анализируемой конструкции. В современных условиях, как правило, этот этап предшествует созданию рабочей конструкторской документации, т.к. позволяет получить практически безошибочные чертежи в автоматизированном режиме. Однако, необходимо отметить, что расчетная 3D-модель и модель, по которой создаются чертежи, – это не одно и то же. Конечно, разработка модели должна вестись согласно требованиям рабочей документации изделия, но с учетом упрощения незначительных элементов конструкции и согласно технологии сборки. Скорость решения системы линейных алгебраических уравнений, заложенных в основе МКЭ [13, 14], напрямую зависит от количества конечных элементов (КЭ) и их размеров. Например, согласно требованиям безопасности и удобства сборки деталей, все острые кроки притупляются по радиусу малой величины (0,2-1 мм), что естественно при создании конечно-элементной сетки приводит к увеличению числа элементов, и как следствие, к росту времени расчета. При этом, с точки зрения прочности плавный переход уменьшает концентрацию напряжений. Это свидетельствует о том, что излишняя детализация геометрической формы элементов решётки, не имеет смысла.

В обязательном порядке модель должна быть скорректирована с учетом сборочных соединений деталей решётки. Например, соединение двух деталей по гарантированной ходовой посадке на чертеже изображается строго при совпадении осей симметрии, т.е. посадочные поверхности изображаются с зазором. Но при моделировании напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций их детали должны входить в контакт друг с другом, в противном случае расчет будет невозможен. Следовательно, детали в сборочной 3D-модели должны быть расположены либо с учетом направления ускорения свободного падения, либо с учетом направления действующих нагрузок.

Необходимо отметить, что отдельного внимания заслуживают сварные соединения, которые являются преобладающими в конструкции решетчатой секции. Сварные соединения должны быть смоделированы таким образом, чтобы они в полной мере отражали физико-механические свойства соединяемых частей деталей. В системе T-Flex при задании граничных условий КЭ-задачи необходимо указать характер контакта сопряженных поверхностей. На рисунке 3 показан

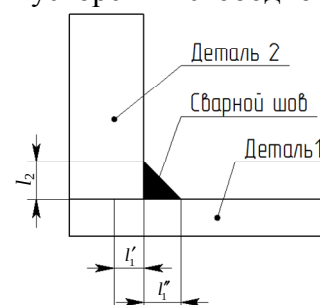


Рис. 3. Сварное соединение

пример задания условий сварного соединения. Тип контакта «жесткая связь» задается для участков: l_1' – для деталей 1 и 2 (околошовная зона); l_1'' – для детали 1 и сварного шва; l_2 – для детали 2 и сварного шва. Для остальных контактируемых граней должно быть задано условие «касание».

Как показывает опыт эксплуатации [8], секция рештачного става конвейера подвержена частым поломкам, которые существенно снижают производительность и эффективность работы. Способы решения проблем обеспечения прочности рештачной секции преимущественно эмпирические.

Использование современных систем инженерного проектирования и применение современных методов, такого как метод конечных элементов, позволяет проанализировать работу рештачной секции скребкового конвейера, на основе которой предложить методологию, описывающую порядок расчета [9].

2. Вычисление внешних нагрузок с учетом конструктивного исполнения рештака

Секция става является одной из самых нагруженных частей конвейера, от работоспособности которой зависят работа и производительность очистного комплекса. Структурно можно выделить несколько позиций, которые оказывают тот или иной эффект на прочность и жесткость рештака: скребок, цепь, механизированная крепь, нагрузка от комбайна и угольной породы. В таблице 1 представлена методика расчета нагрузок, действующих на рештачную секцию.

Табл. 1. Методика расчета нагрузок

№	Наименование нагрузки	Расчетная формула
1	Нагрузка от скребка	$F_1 = \frac{l_p}{l_c} \cdot m_c \cdot g$
2	Нагрузка от цепи	$F_2 = r \cdot \frac{l_p}{l_{зц}} \cdot m_{зц} \cdot g$
3	Нагрузка от опоры комбайна	$F_3 = \frac{m_k \cdot g}{2 \cdot S_{л} + S_p}$
4	Нагрузка от зубчатого колеса комбайна	$F_4 = \frac{N \cdot \eta}{V_p};$
5	Нагрузка от сдвижки крепи	F_5
7	Нагрузка от падения угля	$F_6 = (p_y l_p (b_p h_p + \frac{b_p^2}{4} \operatorname{tg} \gamma)) \cdot g$

Примечание:

l_p – длина рештака и между соседними скребками, м; l_c – расстояние между соседними скребками, м; $l_{зц}$ – внутренняя длина звена цепи, м; $m_c, m_{зц}, m_k$ – соответственно масса скребка, звена цепи, комбайна, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; r – количество рядов цепей; $S_{л}, S_p$ – площадь контактных поверхностей лапы комбайна и комбайна с рейкой, м²; N – мощность привода комбайна, кВт; η – КПД привода комбайна; V_p – сила резания угля, Н; ρ_y – плотность угля, кг/м³; b_p – ширина желоба рештака, мм; h_p – высота желоба рештака, мм; γ – угол естественного откоса породы.

Став конвейера (рис. 4, а) собирают из отдельных секций – рештаков, образованных из двух боковин специального профиля, приваренного к ним донного листа и замков, служащих для соединения секций между собой. Длина рештаков составляет, как правило, от 1 до 2,5 м. Специальный профиль создает контрнаправляющие для цепей и желоб, по которому они

перемещаются. Данный профиль предотвращает приподнимание верхней цепи над каналом под действием сил натяжения и опускание нижней цепи на грунт.

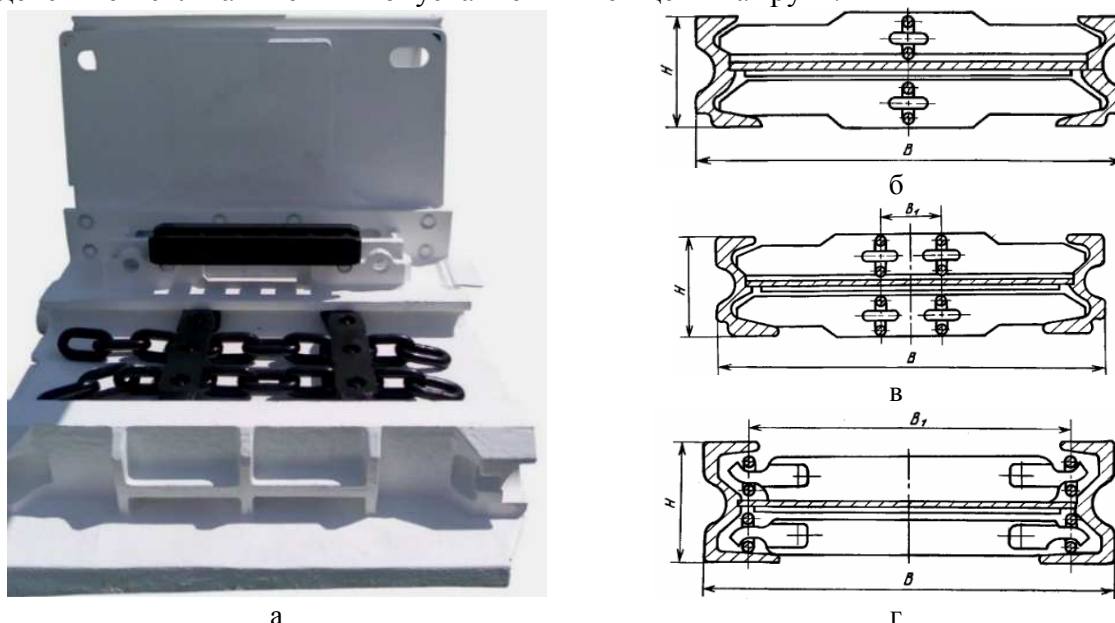


Рис. 4. Секция става скребкового конвейера: H – высота боковины, B – ширина секции, B_1 – расстояние между цепями

К цепям конвейера крепятся скребки, обладающие специальной формой для плавного прохождения выступов и неровностей при его перемещении. Скребки изготавливают из стали, обладающей высокими показателями прочности и стойкой к абразивному износу. Масса скребка, как правило, не превышает 50 кг, расстояние между скребками принимают в пределах от 900 до 1100 мм.

Перемещение скребков обеспечивается с помощью тяговой цепи (масса одного звена составляет примерно 2 кг), могут применяться:

- с одной центрально расположенной цепью (рис. 4, б);
- с двумя центрально расположенными цепями (рис. 4, в);
- с двумя цепями, расположенными в направляющих решетчатого става (рис. 4, г).

Выбор исполнения зависит от условий применения и нагрузок, которые испытывает рабочая поверхность решетчатого става.

Перемещаясь по поверхности решетчатого става скребки, создают нагрузку равную весу скребков, находящихся на секции става. Количество скребков, располагающихся на поверхности секции става, определяется длиной решетки и расстоянием между соседними скребками.

Для перемещения скребков по всей длине скребкового конвейера используются круглозвенные цепи. Количество цепей определяется мощностью комбайна и требуемой производительностью. Количество звеньев, располагающихся на поверхности решетчатой секции определяется длиной звена цепи.

Основную нагрузку на решетчатый став создает передвигающийся вдоль лавы комбайн (рис. 5) и, соответственно, масса угля, падающего на верхний лист секции. Комбайн перемещается вдоль лавы по рейкам, установленным на боковом профиле решетчатого става, масса комбайна варьируется и может достигать 130 т. Вес комбайна передается через опорные стойки на раму решетки, что приводит к существенной нагрузке. Характер распределения этой нагрузки зависит от площади контактной поверхности опор комбайна. Механизм перемещения комбайна вдоль решетчатого става основан на зубчатой реечной передаче. Зубчатое колесо комбайна входит в зацепление с зубьями рейки решетки, создавая необходимую силу для перемещения. Расчет нагрузки на зубья рейки производится на основе технических характеристик комбайна, включая его вес, мощность привода и геометрию зубьев.

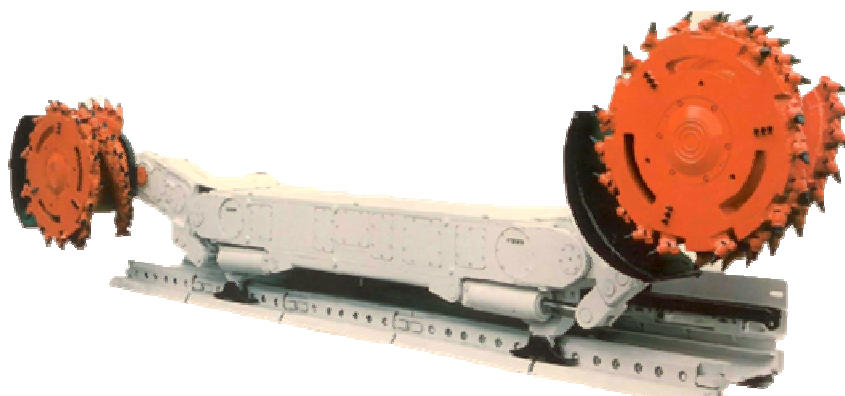


Рис. 5. Очистной комбайн

Крепь обеспечивает поддержание горной выработки, при сдвиге создает дополнительное усилие на рештачный став. Это усилие передается через опорные элементы крепи на боковые профили рештачного става.

При разрушении угля режущим инструментом очистного комбайна нагрузка приходится от падения одного на рабочую поверхность рештачного става. Для определения величины нагрузки необходимо руководствоваться углом естественного откоса, который для угля обычно принимают равным $35-45^\circ$ в зависимости от значения влажности породы.

Также необходимо учитывать нагрузку, создаваемую от собственного веса рештака.

Этот этап является достаточно емким, что естественно ставит задачи разработки программного обеспечения, позволяющего вычислять представленные в таблице 1 нагрузки, в том числе с учетом угла наклона конвейера.

3. Задание нагрузжений в расчетной модели

На данном этапе необходимо вернуться к разработанной трехмерной модели для внесения корректировок согласно расчетным условиям второго этапа. Во-первых, рабочие грани деталей должны быть разделены на участки, по которым они контактируют с элементами очистного механизированного комплекса. Во-вторых, необходимо создать график зависимости нагрузки от координаты точки приложения, как, например, это необходимо сделать для задания нагрузки от угольной массы с учетом естественного угла откоса.

4. Разделение модели на подсистемы

Так как расчетная модель (рис. 6) естественно будет состоять из весьма большого количества КЭ, то расчет займет продолжительное время (от нескольких часов до нескольких суток).

Для того чтобы исключить или минимизировать данную проблему, предлагается применить метод суперэлементов (МСЭ). Сущность данного метода заключается в том, что расчетная модель разделяется на подсистемы, выделяются основные узловые части модели. Для каждой подсистемы применяется своя конечно-элементная задача,

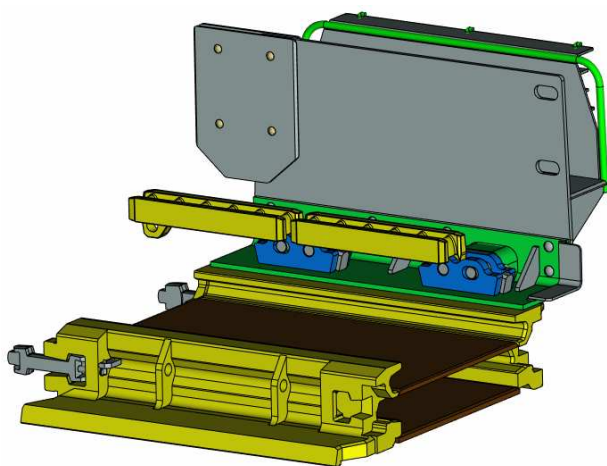


Рис. 6. Модель рештачного става

которая учитывает нагрузки и закрепления, применимые только для конкретной узловой части. Применение данного метода позволит структурировать модель на подсистемы. При выполнении расчетных сценариев их длительность и вероятность ошибки снизится.

Однако данный этап требует дополнительных исследований и в любом случае первоначального расчета полной модели с целью сравнения получаемых результатов. Можно предположить, что отдельными подсистемами могут стать следующие: 1) желоб конвейера,

включающий в себя боковины и листовые элементы; 2) направляющая рейка со своими опорами; 3) кронштейны и подвесы для кабелеукладчика и элементов магистрали гидросистемы. Причем каждая из подсистем должна быть рассчитана при различающихся условиях нагружения в зависимости от стадии работы очистного комплекса.

Заключение

Таким образом, изложенные поэтапные методические подходы к определению и оценке прочности решетчатого става забойного скребкового конвейера позволят вырабатывать рекомендации по его совершенствованию на этапе оптимизации или принятия конструкторских решений. Реализация предложенной методики в виде модулей программного обеспечения позволит не только упростить работу конструктора и сократить время проведения инженерных расчетов, но и избежать излишних затрат материалов, которые ведут не только к удорожанию оборудования, но к сложностям в его монтаже и демонтаже в шахтных условиях.

Список литературы

1. Казанин О.И. Перспективные направления развития технологий подземной угледобычи в РФ // Горный журнал. – 2023. – №9. – С. 4-11. – DOI: 10.17580/gzh.2023.09.01.
2. Пухов Ю.С. Рудничный транспорт: учеб. для техникумов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1991. – 364 с.
3. Габов В.В., Нгуен Ван Суан, Задков Д.А., Чан Дык Тхо. Увеличение содержания крупных фракций в добываемой массе угля комбайном с использованием парных срезов // Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – С. 764-770. – DOI: 10.31897/PMI.2022.66.
4. Функ А.И. Анализ эффективности горно-проходческих и очистных работ при подземной разработке пласта 50 филиала «Шахта «Ульяновская» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №. 6. – С. 177-181.
5. Мешков А.А., Казанин О.И., Сидоренко А.А. Повышение эффективности технологии и организации монтажно-демонтажных работ при интенсивной разработке пологих угольных пластов на шахтах Кузбасса // Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 342-350. – DOI: 10.31897/PMI.2021.3.3.
6. Недашковская Е.С., Шешукова Е.И., Корогодин А.С., Мякотных А.А., Шибанов Д.А., Иванов С.Л. Структура системы технического обслуживания и ремонта горных машин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – №25. – С. 155-162. – DOI: 10.26160/2658-3305-2024-25-155-162.
7. Габов В.В., Шишляников Д.И., Королев А.И., Микрюков А.Ю., Муравский А.К. Обоснование рациональной структуры забойного зарубного скребкового конвейера // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2023. – №1. – С. 46-54. – DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-46-54.
8. Ордин А.А., Тимошенко А.М., Ботвенко Д.В., Никольский А.М. Обоснование оптимальной длины и производительности очистного забоя при отработке мощного угольного пласта шахты "Талдинская-Западная-1" // Уголь. – 2019. – №3(1116). – С. 50-54. – DOI: 10.18796/0041-5790-2019-3-50-54.
9. Zhang Q., Zhang R., Tian Y. Scraper Conveyor Structure Improvement and Performance Comparative Analysis // Strength of Materials. 2020, vol. 52, no. 4, pp. 683-690.
10. Лукиенко Л.В. Результаты стендовых исследований реечного механизма подачи тяжело нагруженных машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – №9. – С. 576-579. – DOI: 10.24412/2071-6168-2021-9-576-579.
11. Павлюкевич Д.А., Иванов С.Ю. Модернизация шахтного скребкового конвейера Анжера 38 на шахте "Костромовская" // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции. – Прокопьевск: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2024. – С. 193-197.
12. Варнава А.В., И.А. Жуков К разработке методики расчета напряженно-деформированного состояния секции става шахтного скребкового конвейера // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – № 8. – С. 35-39.
13. Xuewen Wang, Bo Li, Rui Xia, Haozhou Ma. Application of DEM in Coal and Agricultural Machinery // Engineering Applications of Discrete Element Method. – Springer, Singapore, 2020. – P. 21-34.
14. Стародубов А.Н., Кадочигова А.Н., Каплун А.В. Использование метода дискретных элементов для имитационного моделирования выемки угля очистным комбайном // Горная промышленность. – 2023. – №S2. – С. 150-154. – DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S2-150-154.
15. Котельников А.А., Абышев, К.И., Алпеева Е.В. Расчет на прочность сварных конструкций методом конечных элементов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2013. – №2. – С. 036-040.

References

1. Kazanin O.I. Promising technology trends in underground coal mining in Russia // Gornyi Zhurnal. 2023, no. 9, pp. 4-11. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.01.
2. Pukhov Yu.S. Mine transport: textbook for technical schools. – 2nd ed., revised and add. – M.: Nedra, 1991. – 364 p.
3. Gabov V.V., Xuan N.V., Zadkov D.A., Tho T.D. Increasing the content of coarse fractions in the mined coal mass by a combine using paired cuts // Journal of Mining Institute. 2022, vol. 257, pp. 764-770. DOI: 10.31897/PMI.2022.66.
4. Funk A.I. Analysis of the effectiveness of mining and cleaning operations during underground mining of reservoir 50 of the Ulyanovsk Mine branch // Mining information and Analytical Bulletin. 2007, no. 6, pp. 177-181.
5. Meshkov A.A., Kazanin O.I., Sidorenko A.A. Improving the efficiency of the technology and organization of the longwall face move during the intensive flat-lying coal seams mining at the Kuzbass mines // Journal of Mining Institute. 2021, vol. 249, pp. 342-350. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.3.
6. Nedashkovskaya E.S., Sheshukova E.I., Korogodin A.S., Myakotnykh A.A., Shibanov D.A., Ivanov S.L. Structure of the system of maintenance and repair of mining machines // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2024, no. 25, pp. 155-162. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-25-155-162.
7. Gabov V.V., Shishliannikov D.I., Korolev A.I., Mikriukov A.Yu., Muravskii A.K. Rationale for the efficient design of a face scraper-type cutting conveyor // Minerals and Mining Engineering. 2023, no. 1, pp. 46-54. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-46-54.
8. Ordin A.A., Timoshenko A.M., Botvenko D.V., Nikolskiy A.M. Engineering study of optimal coalface length and productivity in thick-seam mining at "Taldinskaya-Zapadnaya-1" mine // Ugol. 2019, no. 3, pp. 50-54. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-3-50-54.
9. Zhang Q., Zhang R., Tian Y. Scraper Conveyor Structure Improvement and Performance Comparative Analysis // Strength of Materials. 2020, vol. 52, no. 4, pp. 683-690.
10. Lukienko L.V. The results of experimental studies of the rack-and-pinionhaulage mechanism of heavily loaded machines // News of Tula State University. Technical sciences. 2021, no. 9, pp. 576-579. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-9-576-579.
11. Pavlyukevich D.A., Ivanov S.Yu. Modernization of the Angera 38 mine scraper conveyor at the Kostromovskaya mine // Prospects of innovative development of the coal regions of Russia: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference. – Prokopyevsk: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2024. – P. 193-197.
12. Varnava A.V., Zhukov I.A. To the development of a methodology for calculating the stress-strain state of the stave section of a mine scraper conveyor // Mining equipment and electromechanics. 2012, no.8, pp. 35-39.
13. Xuewen Wang, Bo Li, Rui Xia, Haozhou Ma. Application of DEM in Coal and Agricultural Machinery // Engineering Applications of Discrete Element Method. – Springer, Singapore, 2020. – P. 21-34.
14. Starodubov A.N., Kadochigova A.N., Kaplun A.V. Application of the discrete element method for simulation of coal mining by a cutter-loader in a working face // Mining industry. 2023. no. S2, pp. 150-154. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S2-150-154.
15. Kotelnikov A.A., Abyshv, K.I., Alpeeva E.V. Calculation of the strength of welded structures by the finite element method // News of Southwestern State University. Series: Engineering and technology. 2013, no. 2, pp. 036-040.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Лазарев Артур Дмитриевич – аспирант	Lazarev Artur Dmitrievich – postgraduate student
Жуков Иван Алексеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой машиностроения	Zhukov Ivan Alekseevich – doctor of technical sciences, associate professor, head of Department of mechanical engineering
tmmiok@yandex.ru	

Получена 16.03.2025