ISSN 2518-1653 (online)
vestnik.donntu.org

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЕСТНИК

№2 (16) 2019 г.

Совет молодых ученых ДОННТУ

ysc.donntu.org

10 ЛЕТ ★ ★ ★ ИННОВАЦИЙ

НАУЧНЫЕ ИЗДАНИЯ Донецкого национального технического университета



Международный научно-технический журнал «Вестник Донецкого национального технического университета»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000133, выдано 27.05.2017 г.
Приказ МОН ДНР № 1144 от 07.11.2017 г. о включении в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР
Лицензионный договор с РИНЦ № 425-07/2016 от 14.07.2016 г.

Периодичность – 4 раз в год

Научные направления:
05.02 Машиностроение и машиноведение;
05.05 Транспортное, горное и строительное машиностроение;
05.09 Электротехника;
05.16 Металлургия и материаловедение;
05.17 Химическая технология.

Подробная информация - http://vestnik.donntu.org



Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000125 от 20 апреля 2017 г. (сетевое издание)
Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000147 от 20 июня 2017 г. (печатное издание)
Приказ МОН ДНР №744 от 24.07.2017 г. о включении в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР
Лицензионный договор с РИНЦ № 177-04/2013 от 12.04. 2013 г.

Периодичность – 4 раз в год

Научные направления:
05.02 Машиностроение и машиноведение.

Подробная информация - http://ptsm.donntu.org



Научный журнал «Культура и цивилизация (Донецк)»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000143 от 20.06.2017 г.
Приказ МОН ДНР №1134 от 01.11.2016 г. о включении в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР
Лицензионный договор с РИНЦ № 425-07/2016 от 14.07.2016 г.

Периодичность – 4 раз в год

Научные направления:
09.00 Философские науки;
23.00 Политология.

Подробная информация - http://cic.sgi.donntu.org

Вестник ДонНТУ №2(16)'2019

международный научно-технический журнал

Учредитель и издатель: *ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)*

Главный редактор
Маренич К.Н. (д.т.н., проф.)*

Зам. главного редактора
Булгаков Ю.Ф. (д.т.н., проф.)*

Ответственный секретарь
Сотников А.Л. (д.т.н., доц.)*

Редакционный совет:
Артюх В. Г. (д.т.н., проф.)
Беломеря Н.И. (к.т.н., доц.)*
Бершадский И.А. (д.т.н., проф.)*
Бирюков А.Б. (д.т.н., проф.)*
Бутузова Л.Ф. (д.х.н., проф.)*
Высоцкий Ю.Б. (д.х.н., проф.)*
Горбатко С.В. (к.т.н., доц.)*
Горбатюк С. М. (д.т.н., проф.)*
Дедовец И.Г. (к.т.н., доц.)*
Еронько С.П. (д.т.н., проф.)*
Захаров Н.И. (д.т.н., доц.)*
Ковалев А.П. (д.т.н., проф.)*
Кожевникова И.А. (д.т.н., доц.)
Кондрахин В.П. (д.т.н., проф.)*
Кононенко А.П. (д.т.н., проф.)*
Куренный Э.Г. (д.т.н., проф.)*
Ченцов Н.А. (д.т.н., доц.)*
Шабаев О.Е. (д.т.н., проф.)*
Шаповалов В.В. (д.х.н., проф.)*
Яковченко А.В. (д.т.н., проф.)*
** - штатные сотрудники учредителя*

Адрес: 28301, г. Донецк, ул. Артема, 58
Телефон +380 (62) 301-07-89
Эл. почта: vestnikdonntu@gmail.com
Интернет: vestnik.donntu.org

Вестник ДонНТУ
2019. №2(16)

ISSN 2518-1653 (online)

Издается с января 2016 г.
Периодичность издания: 4 раза в год

Свидетельство
о государственной регистрации
Серия ААА № 000133 от 27.05.2017

За содержание статей и их оригинальность несут ответственность авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов. За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Подписано к печати
по решению Ученого Совета
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»
Протокол №5 от 28.06.2019

Формат 60×84 1/8. Заказ 0619.
Изд-во «Донецкая политехника», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

Е.С. Дубинка, М.Ю. Ткачев, М.С. Зорина
Инновационные перспективы Донбасса глазами молодых ученых 3
В.В. Колосова
V Международный научный форум ДНР 8

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Е.М. Арефьев, С.А. Матвиенко
Экспериментальное определение коэффициента контактной жесткости конвейерной ленты подъемно-транспортных машин непрерывного действия 12
П.П. Зинченко
Тенденции повышения производительности очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов 17
Е.Л. Игнаткина
Экспериментальные исследования тормозных устройств шахтных подвесных монорельсовых дорог 27
М.П. Кондратенко
Оценка геометрических параметров тягового устройства при движении по закруглениям монорельсового пути 33
В.П. Кондрахин, Д.А. Демѐшин
Математическая модель динамики привода машины при срабатывании предохранительной муфты с радиальным движением шариков 41
В.Б. Малеев, Н.И. Скорынин, А.А. Кудрявцев
Автоматическое регулирование концентрации гидросмеси в подъемной трубе эрлифта 46
Н.В. Савенков, В.В. Бутенко
Исследование и оптимизация режимов работы двигателя и бесступенчатой трансмиссии транспортного средства 52
О.Е. Шабаев, Н.Г. Афендиков, А.В. Шендрик
Определение рациональной периодичности технических обслуживаний и ремонтов гидроприводов проходческих комбайнов избирательного действия 61

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

И.А. Бершадский, А.В. Згарбул, А.А. Кулиш
Обоснование способа защиты электрической сети напряжением 220 В от перегрузок с учетом нестационарного нагрева электропроводки 71
Е.С. Дубинка
Индукционно-динамическое торможение асинхронного двигателя как способ ограничения энергетического воздействия на шахтную электрическую сеть в процессе защитного отключения 80
В.И. Калашников, А.А. Чепига
Анализ концепции vehicle-to-grid 89
И.В. Ковалѐва, О.К. Маренич
Токоограничение цепи защитного отключения как инновационное решение в области повышения ресурса шахтной участковой трансформаторной подстанции 95

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В.Г. Артюх, Н.В. Чернышева, Е.Л. Яковлева, А.А. Никитченко, В.О. Мазур
Испытания моделей упругих валов-энергоаккумуляторов приводов непрерывных широкополосных станов 102
В.В. Кашаев
Особенности управления рекуперативными горелками в кузнечной печи камерного типа 114
А.В. Яковченко, С.А. Снитко, В.В. Пилипенко, Н.И. Ивлева
Метод автоматизированного проектирования профилей черновых бандажей и фланцев 121

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Л.Ф. Бутузова, В.Н. Шевкопляс, В.А. Колбаса, Г.Н. Бутузов
Радикалы бурых углей, образующиеся в процессе химической и термохимической обработки 128
В.В. Шаповалов, С.В. Горбатко
Получение алюмокальциевого спека из отходов горнодобывающих производств для извлечения глинозема методом бесщелочного спекания 137

ИНФОРМАЦИЯ

Требования к статьям, направляемым в редакцию 144

Информация об издании

– На страницах журнала публикуются научные статьи фундаментального и прикладного характера, информация о конференциях, семинарах и выставках; освещается деятельность ведущих научно-исследовательских и проектных институтов, промышленных предприятий и коммерческих организаций, технопарков.

– Журнал оказывает информационную поддержку в продвижении на рынок конкурентоспособной наукоемкой продукции, проектов, научно-технических разработок и высоких технологий в различных областях промышленности.

– Журнал распространяется бесплатно в эл. виде посредством сети Интернет; принимает участие в научных конференциях и выставках.

– Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Интернет: elibrary.ru

– Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК) ДНР. Интернет: vak.mondnr.ru

– Редакция журнала принимает к публикации и осуществляет рецензирование рукописей статей по химическим и техническим наукам и следующим группам специальностей: 05.02 – Машиностроение и машиноведение; 05.05 – Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.09 – Электротехника; 05.16 – Металлургия и материаловедение; 05.17 – Химическая технология.

VESTNIK DONNTU №2(16)'2019

international scientific-technical journal

Founder and publisher *Donetsk National Technical University (Donetsk)*

Editor-in-chief
Marenych K.N. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*

Deputy Editor-in-chief
Bulgakov Y.F. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*

Executive secretary
Sotnikov A.L. (Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.)*

Editorial council:
Artyukh V. G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Belomerya N. I. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Bershadsky I. A. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Biryukov A.B. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Butuzova L.F. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Vysotsky Y.B. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Gorbatko S. V. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Gorbatyuk S. M. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Dedovets I.G. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Eron'ko S.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Zaharov N. I. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Kovalev A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kozhevnikova I. A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)
Kondrahin V.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kononenko A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kurennyiy E. G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Chentsov N. A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Shabayev O.E. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Shapovalov V.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
Yakovchenko A.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
** - staff members of the founder*

Address: 283001, Donetsk, 58, Artema St.
Phone +380 (62) 301-07-89
E-mail: vestnikdonntu@gmail.com
Internet: vestnik.donntu.org

Vestnik DonNTU
2019. No.2(16)

ISSN 2518-1653 (online)

Published since January, 2016
Publication frequency: 4 times a year

Certificate of State Registration
Series AAA No. 000133
dated 27.05.2017

The content and originality of the articles is the author's responsibility. The editorial opinion may not necessarily represent the views of the authors.
The content of advertising material is the advertiser's responsibility.

Subscribed to print
on the recommendation
of the Academic Council
Donetsk National Technical University
Protocol No.5 dated 28.06.2019

Format 60×84$^{1/8}$. Order 0619
Publishing house
"Donetsk Polytechnic", 2019

CONTENTS

SCIENTIFIC NOTES

E.S. Dubinka, M.Yu. Tkachev, M.S. Zorina
Innovative perspectives of Donbass through the eyes of young scientists 3
V.V. Kolosova
V International scientific forum of the DPR 8

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION ENGINEERING

I.M. Ariefiev, S.A. Matvienko
Experimental determination of the contact rigidity coefficient of the conveyor belt of continuous action conveying machines 12
P.P. Zinchenko
Trends to improve the performance of cutter-loaders for thin halfhorizontal layers 17
E.L. Ignatkina
Experimental study of braking devices of mine suspended monorail tracks 27
M. P. Kondratenko
Evaluation of geometrical parameters of the traction device moving along the curves of a monorail track 33
V.P. Kondrakhin, D.A. Demeshin
Mathematical model of the machine drive dynamics during the operation of the safety clutch with the radial motion of the balls 41
V.B. Maleev, N.I. Skorynin, A.A. Kudryavtsev
Automatic regulation of the slurry concentration in the airlift pipe 46
N.V. Savenkov, V.V. Butenko
Research and optimization of operating modes of the engine with continuously variable transmission of the vehicle 52
O.E. Shabaev, N.G. Afendikov, A.V. Shendrik
The determination of rational service and repair frequency of hydraulic drives of selective action roadheaders 61

ELECTRICAL ENGINEERING

I.A. Bershadskiy, A.V. Zgarbul, A.A. Kulish
Substantiation of the method for overload protection of voltage 220 V electric networks taking into account the nonstationary heating of the wiring 71
E.S. Dubinka
Induction dynamic braking of an asynchronous motor as a way of restricting the energy exposure to a mine electric network in the process of protective tripping 80
V.I. Kalashnikov, A.A. Chepiga
The analysis of vehicle-to-grid concept 89
I.V. Kovaljova , O.K. Marenich
Limitation of electric current in protective disconnecting device as innovative decision for increase of life of mine section transformer substation 95

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

V.G. Artiukh, N.V. Chernysheva, E.L. Yakovleva, A.A. Nikitchenko, V.O. Mazur
Tests of models of elastic damping shaft-accumulator of continuous strip mills drive unit 102
V.V. Kashayev
Control of recuperative burners in the forge furnace of chamber type 114
A.V. Yakovchenko, S.A. Snitko, V.V. Pilipenko, N.I. Ivleva
The method for automated design of rough profiles of bandages and flanges 121

CHEMICAL TECHNOLOGY

L.F. Butuzova, V.N. Shevkoplyas, V.A. Kolbasa, G.N. Butuzov
The brown coal radicals formed during chemical and thermo-chemical treatment 128
V.V. Shapovalov, S.V. Gorbatko
Production of alumocalcium sinter from mining industry waste for extraction of alumina by the method of alkali free sintering 137

INFORMATION

Requirements for the papers submitted to the Editorial office 144

Publication Information

– The journal publishes research papers of fundamental and applied nature, information on conferences, seminars and exhibitions. It covers the activities of the leading research and design institutes, industrial and commercial companies and technology parks.
– The journal provides information support for the marketing of competitive high-tech products, projects, scientific and technical developments and high technologies in various fields of industry.
– The journal is distributed free of charge in electronic format via the Internet. It provides informational support and participates in International scientific conferences and exhibitions.
– The journal is included into the Russian Index of Science Citation (RISC). Internet: elibrary.ru
– The journal is included in the list of peer-reviewed scientific publications of the Higher Attestation Commission (VAK) of the DPR. Internet: vak.mondnr.ru
– The editorial accepts for publication and reviews manuscripts on chemical and technical sciences, and the following groups of specialties: 05.02 – Engineering and engineering science; 05.05 – Transport, mining and construction engineering; 05.09 – Electrical engineering; 05.16 – Metallurgy and materials science; 05.17 – Chemical technology.

УДК 007

Е.С. Дубинка, М.Ю. Ткачев, М.С. Зорина
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ИННОВАЦИОННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДОНБАССА ГЛАЗАМИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

Рассмотрены основные цели и задачи необходимости проведения научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса» как платформы для обмена мнениями и исследовательскими разработками по приоритетным научным направлениям.

Ключевые слова: *инновационная деятельность, научно-техническое творчество, молодые ученые, профессиональное сообщество.*

Ежегодно на базе ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (ДонНТУ) в рамках Международного научного форума проходит конференция «Инновационные перспективы Донбасса». В нынешнем году мероприятие было юбилейным – пятым по счету.

Конференция проводится Советом молодых ученых ДонНТУ с 2015 года и стала уже традиционным значимым событием для научного сообщества Донецка, где появляется возможность обмениваться новейшими знаниями и достижениями в различных областях науки.

Совет молодых ученых ДонНТУ был воссоздан в апреле 2009 года, объединяющий на добровольной основе молодых ученых для удовлетворения их культурных, научных и творческих интересов, связанных с реализацией уставных целей и задач. Сегодня в состав Совета входят 10 членов Совета – представители факультетов и институтов, студенческого научного общества университета.

За пятилетнюю историю проведения конференции возможность обмена мнениями и общения привлекла крупнейших специалистов и ученых из научно-исследовательских институтов, производственных предприятий, преподавателей и молодых ученых Донбасса, Российской Федерации, стран ближнего и дальнего зарубежья (рис. 1…3).

По статистике, в пленарном и секционных заседаниях конференции ежегодно принимают участие более 1000 человек. Формат конференции предусматривает не только доклады и презентации спикеров, но и интерактивные выступления, оживленные дискуссии и научные споры.

Бесспорным преимуществом подобных мероприятий является их практическая направленность, отличная возможность послушать докладчиков высокого уровня, наладить деловые контакты с представителями профессионального сообщества из разных стран.

По единодушному мнению участников, данная конференция является очень актуальной и деловой встречей для широкого спектра профессионалов своего дела.



Рис. 1. Министр промышленности и торговли ДНР Э.В. Арматов и ректор ДонНТУ А.Я. Аноприенко знакомятся с экспонатами выставки, 2019 г.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



Рис. 2. Пленарное заседание конференции, 2019 г.



Рис. 3. Демонстрация стенда на выставке научно-технических разработок молодых ученых, 2016 г.

В рамках работы конференции «Инновационные перспективы Донбасса» задействованы несколько тематических направлений, в частности, ставшее традиционным заседание секции «Актуальные проблемы инновационного развития экономики Донбасса» в центре мультимедийных технологий инженерно-экономического факультета ДонНТУ.

Темами для обсуждения становятся практический опыт по внедрению и управлению инновациями в различных отраслях народного хозяйства Донецкого региона – от ресурсосбережения на конкретном предприятии до космоса. Данное мероприятие становится интересным и значимым не только для ученых и практиков нашего региона, но и за его пределами [1,2]. В 2018 году заседание секции посетил и выступил с приветственным словом почетный гость Анатолий

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Павлович Арцебарский, летчик-космонавт СССР, 71-й космонавт СССР, летчик-испытатель, Герой Советского Союза, общественный и научный деятель Российской Федерации.

Целью работы секции «Проблемы и перспективы в горном деле и строительстве» является обсуждение студентами, аспирантами, учеными, инженерами существующих проблем горнодобывающей и строительной отраслей. В частности, в 2019 году активно обсуждались вопросы износа оборудования шахт, современных технологий строительства различных предприятий, комплексного использования терриконов Донбасса, испытания строительных материалов, расширения подрабатываемых территорий и их влияния на окружающую среду и другие вопросы, непосредственно связанные с безопасностью горнодобывающей промышленности.

Особое внимание по результатам работы секции уделяется внедрению перспективных разработок научно-исследовательских и проектных институтов в производственные процессы при строительстве зданий и подземных сооружений.

Секция «Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов» является универсальной, поскольку охватывает тематику ряда отраслей промышленности, создающих продукцию с высокой добавленной стоимостью. Одними из главных показателей развития любого государства в мире являются уровень развития машиностроения, механизация и автоматизация технологических операций, культура труда и т.д. В этом отношении работа секции позволяет проследить становление экономики нашего региона. Наглядное тому подтверждение дает статистика отобранных для публикации лучших докладов. В 2015 году эта цифра составляла 16 докладов, в 2016 г. – 11, в 2017 г. – 27, в 2018 г. – 35.

Хорошим дополнением к докладам на секции является экспозиция физических моделей на выставке научно-технических разработок молодых ученых Донбасса, которая проходит одновременно с конференцией в Музее истории ДонНТУ.

Так, в частности, в 2018 г. факультетом инженерной механики и машиностроения были представлены физические модели конвертера с вращающимся корпусом (рис. 4), предназначенного для переработки некачественной шихты и металлсодержащих отходов с высоким содержанием вредных примесей; выгрузочного устройства (рис. 4) шахтной известково-обжигательной печи; установки для проветривания карьеров, снабженной безлопастным вентилятором.



Рис. 4. Экспозиция физических моделей факультета инженерной механики и машиностроения на выставке научно-технических разработок молодых ученых Донбасса, 2018 г.:
передний план – конвертер с вращающимся корпусом для переработки некачественной шихты и металлсодержащих отходов с высоким содержанием вредных примесей;
задний план – выгрузочное устройство шахтной известково-обжигательной печи

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Актуальность вышеперечисленных разработок отечественных ученых подтверждена патентами Российской Федерации на изобретения [3…5]. Следует также отметить, что исследования в этой области являются актуальными и в странах дальнего зарубежья [6]. Эти обстоятельства имеют положительное значение с точки зрения реализации программ импортозамещения продукции тяжелого машиностроения.

Кроме выше обозначенных секций конференции «Инновационные перспективы Донбасса» следует выделить секцию «Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем», на заседаниях которой рассматриваются актуальные вопросы в области разработки и внедрения энергосберегающих технологий на предприятиях, а также секцию «Перспективные направления развития экологии и химической технологии», целью которой является разработка экологически чистых, малоотходных технологий с использованием отечественного сырья, в том числе техногенных промышленных отходов, конкретных технических решений и мероприятий по экологической безопасности и охране труда предприятий Донбасса [7].

Работа секции «Перспективные технологии в геологоразведочной и нефтегазовой отраслях, геодезии и маркшейдерии» направлена на обсуждение приоритетных направлений научно-технической деятельности в геологоразведочной, нефтегазовой отраслях, маркшейдерии, геодезии и землеустройства.

В работе секции принимают участие преподаватели и молодые ученые ДонНТУ, ученые из ведущих профильных организаций Российской Федерации и ДНР в области геодезии, маркшейдерии, геологии, землеустройства. В 2019 г. впервые приняли участие ученые из Республики Казахстан. Проводится работа по расширению тематики совместных научных исследований, выполняемых объединенными коллективами ученых Донбасса и Российской Федерации. Научные разработки в области маркшейдерского дела, геодезии, представленные на конференции учеными профильных организаций ДНР, активно внедряются в учебный процесс.

Таким образом, организаторы конференции «Инновационные перспективы Донбасса» ежегодно ставят перед собой и успешно достигают следующие цели:

– кооперация творческих коллективов при решении актуальных научно-технических задач и проблем, имеющих важное хозяйственное значение;

– обобщение актуальных инновационных разработок, а также теоретических исследований, сопровождающих их (рис. 5);

– способствование в выработке и поддержании высокого уровня культуры труда на таких этапах жизненного цикла промышленных машин и агрегатов, как проектирование, изготовление и эксплуатация.

5-я Международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса» вызвала большой интерес научного сообщества Донецкой Народной Республики и ряда других стран. Свидетельством этого является более 200 научных работ, поступивших в оргкомитет. Материалы представлены специалистами ведущих высших учебных заведений и научно-исследовательских учреждений. А география конференции 2019 г. охватила такие страны, как Российская Федерация, Луганская Народная Республика, Республика Казахстан и Болгария.



Рис. 5. На выставке научно-технических разработок, 2019 г.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

По материалам конференции изданы сборники трудов в электронном виде, с которыми можно ознакомиться в открытом доступе на интернет-сайте форума «Инновационные перспективы Донбасса» – http://ipd.donntu.org.

Следует отметить важность проведения подобных мероприятий, где ученые и специалисты получают возможность в расширенном формате обсуждать свои идеи, обмениваться мнениями и исследовательскими разработками по приоритетным научным направлениям. Участники конференции могут продемонстрировать навыки публичного выступления и аргументации своей научной позиции. Из года в год исследования многих авторов представляют собой серьезные проекты, направленные на повышение экономической эффективности предприятий Донецкого региона или модернизацию оборудования.

Список литературы

1. Зорина, М.С. Формирование системы развития персонала в ходе инновационных преобразований в экономике / М.С. Зорина, Д.С. Карячкина // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 4-й Международной научно-практической конференции 22–25 мая 2018 г., г. Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Т.5. – С. 241-248.
2. Зорина, М.С. Социальное партнерство как инструмент регулирования социально-трудовых отношений / М.С. Зорина, А.А. Власенко // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 4-й Международной научно-практической конференции 22–25 мая 2018 г., г. Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Т.5. – С. 203-209.
3. Патент 2623934 РФ, C21C 5/42, C21C 5/28. Кислородный конвертер для переработки чугуна и металлического лома с повышенным содержанием вредных примесей / С.М. Горбатюк, С.П. Еронько, Н.А. Климович; ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; № 2016111484, заявл. 29.03.2016; опубл. 29.06.2017.
4. Патент 2623402 РФ, F27B 1/20. Устройство для разгрузки шахтной известково-газовой печи / Е.Н. Смирнов, С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев и др.; ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; № 2016119781, заявл. 23.05.2016; опубл. 27.06.2017.
5. Патент 2630443 РФ, F24F 7/00, F04D 25/00, F04D 29/00. Узел безлопастного вентилятора для эвакуации газопылевых выбросов из промышленных агрегатов / Е.Н. Смирнов, С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев и др.; ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; № 2016119782, заявл. 23.05.2016; опубл. 07.09.2017.
6. Eron'ko, S.P. Numerical analysis and design of an efficient system of unloading of lime from a shaft burning furnace / S.P. Eron'ko [et al.] // Metallurgist. – 2018. – No.7-8. Vol.62. – P. 648-657.
7. Логвиненко, Д.А. Учет вероятностного характера механического поведения рабочих масс / Д.А. Логвиненко, Д.В. Ильченко // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 4-й Международной научно-практической конференции 22 – 25 мая 2018 г., г. Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Т.4. – С. 142-146.

Сведения об авторах

Е.С. Дубинка
SPIN-код: 3110-5247
Author ID: 914120
ORCID iD: 0000-0002-3003-6421
Телефон: +380 (71) 302-74-94
Эл. почта: ekaterina_sd@bk.ru

М.С. Зорина
SPIN-код: 4700-9391
Author ID: 837546
ORCID iD: 0000-0002-3763-7983
Телефон: +380 (71) 343-17-94
Эл. почта: maria_z11@mail.ru

М.Ю. Ткачев
SPIN-код: 9855-0447
Author ID: 57189358257
ORCID iD: 0000-0001-5795-9595
Телефон: +380 (71) 334-92-61
Эл. почта: mishel-tkachev@ya.ru

Статья поступила 14.02.2019 г.
© Е.С. Дубинка, М.Ю. Ткачев, М.С. Зорина, 2019

УДК 007

В.В. Колосова
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

V МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ ДНР

21…23 мая 2019 года в Донецке состоялся юбилейный V Международный научный форум ДНР «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие». Основная цель Форума – развитие научной активности молодежи, привлечение ее к решению актуальных задач современной науки, сохранение и развитие научного потенциала молодой Республики.

Ключевые слова: *научно-техническое развитие, инновационная деятельность, сотрудничество, научные мероприятия, научная общественность.*

Международный научный форум Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие» является крупнейшей площадкой в Донецком регионе, объединяющей образовательные учреждения, научные организации, производственные предприятия, ученых, преподавателей и обучающихся из Луганской и Донецкой Народных Республик, Российской Федерации и других стран. Форум проводится в Донецком национальном техническом университете с 2015 года по инициативе Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики.

С учетом международного опыта применения информационных технологий в обществе и государственном управлении были выделены следующие приоритетные направления Форума:

– цифровое образование как основа цифровой экономики;

– информационные технологии в культурной сфере;

– развитие автотранспортного комплекса в Республике и его научно-технические аспекты;

– улучшение качества подготовки инженерных кадров для всех отраслей промышленности ДНР;

– способы привлечения инвестиций для трансфера технологий;

– текущие возможности науки в сфере создания инноваций.

У Форума есть одно важное отличие от многих других подобных мероприятий. Он проводится для молодых и молодыми. В этом году было проведено около 25 оффлайн-мероприятий в трех крупнейших городах Республики – Донецке, Макеевке, Горловке. Суммарное количество участников превышало 5000 человек из 45 городов мира.

Открытие Форума состоялось 21 мая 2019 года в Донецком национальном техническом университете (ДонНТУ). На нем присутствовало около 1000 человек (столько смог вместить большой актовый зал 9-го корпуса университета). Кроме этого, была впервые организована online-трансляция на Youtube-канале видеожурнала «Донецкий политехник».

Пленарное заседание разделилось на две части – приветственную и деловую. Приветственную часть торжественно открыл ректор ДонНТУ А.Я. Аноприенко, поздравив всех участников с проведением такого важного мероприятия, и зачитал приветственный адрес от Главы ДНР Д.В. Пушилина.

«Мы верим в то, что инновационное развитие Донбасса – это главный путь, который обеспечит нам в будущем восстановление промышленности, интенсивное развитие и выход в передовые индустриальные регионы», – сказал А.Я. Аноприенко.

С приветствиями также выступили руководители республиканских ведомств: министр связи В.В. Яценко, министр промышленности и торговли Э.В. Арматов (рис. 1), Р.М. Дубровский, министр угля и энергетики, заместитель министра образования и науки В.Н. Варюхин, первый заместитель министра угля и энергетики А.А. Нестеренко, председатель Госкомитета по науке и технологиям А.А. Стукалов, председатель Профсоюза работников образования и науки А.С. Горшкова.

После приветствий и поздравлений выступили шесть спикеров со следующими докладами:

1. «Стратегические направления развития Донецкой Народной Республики на период до 2024 года», докладчик – министр экономического развития ДНР Алексей Владимирович Половян;

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

2. «Перспективы развития промышленности Донецкой Народной Республики», докладчик – министр промышленности и торговли ДНР Эдуард Викторович Арматов;

3. «Технологический Донецкий кряж: миссия технического университета в упрочении наследия прошлого и формировании будущего», докладчик – ректор ДонНТУ Александр Яковлевич Аноприенко;

4. «Донецкий национальный университет: миссия в укреплении научно-промышленного, социально-гуманитарного и кадрового потенциала Донецкой Народной Республики», докладчик – председатель Совета ректоров образовательных организаций высшего профессионального образования ДНР, ректор Донецкого национального университета Светлана Владимировна Беспалова (рис. 2);

4. «Научное обеспечение решений актуальных проблем строительного комплекса Донецкой Народной Республики», докладчик – проректор по научной работе Донбасской национальной академии строительства и архитектуры Владимир Филиппович Мущанов;

6. «Внедрение автоматизированной системы управления технологическим процессом на энергоблоке №3 Зуевской ТЭС», докладчик – ведущий специалист отдела по подготовке и проведению ремонтов ОП «Зуевская ТЭС» РП «Энергия Донбасса» Владимир Станиславович Обидченко.

На II выставке научно-технических разработок обучающимися и молодыми учеными в этом году было представлено 50 разработок, разброс направлений – от кузнечного дела до робототехники (рис. 3, 4). Участие в выставке приняли студенты ДонНТУ, ДонНАСА, ДонРЦТТ, ДонИЖТ и других образовательных учреждений.



Рис. 1. Арматов Эдуард Викторович – министр промышленности и торговли ДНР



Рис. 2. Беспалова Светлана Владимировна – ректор Донецкого национального университета



Рис. 3. Работы студентов ДонНТУ И. Изина и Д. Свиридова



Рис. 4. Работы студентов ДонРЦТТ П. Бакулина и Д. Головина

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Второй по значимости площадкой для проведения мероприятий Форума стал Автомобильно-дорожный институт ДонНТУ в Горловке, где рассматривались пути решения вопроса по внедрению современных и долговечных технологий по ремонту дорожного покрытия, восстановлениию дорог местного значения, развитию транспортной системы ДНР.

Юные участники выставки были награждены грамотами Студенческого научного форума ДонНТУ (рис. 5, 6).

А также авторы лучших 10-ти экспонатов были награждены грамотами и подарками Общественной организации «Молодая Республика».

Особое место на Форуме заняла экспозиция «Аддитивные технологии в ДонНТУ». Сейчас аддитивные технологии – одни из самых передовых и востребованных во всем мире технологий, и ДонНТУ идет в ногу с мировыми трендами и развивает это направление. Аддитивные технологии (additive manufacturing – от слова «аддитивный» – прибавляемый) – это послойное наращивание и синтез объекта с помощью специализированных инструментов (3D-принтера). Изобретение принадлежит Чарльзу Халлу, в 1986 г. сконструировавшему первый стереолитографический трехмерный принтер. А спустя 33 года после первого такого принтера студент электротехнического факультета ДонНТУ В.В. Якушев осваивает известные технические решения и создает свой вариант 3D-принтера, который предназначен для печати моделей из ABS-пластика, предварительно разработанных в графическом редакторе (рис. 7, 8).

Суть работы принтера состоит в использовании технологии FDM (fused deposition modeling), которая послойно печатает объекты из расплавленной пластиковой нити. Анализ новейших разработок показывает, что аддитивные технологии в будущем – это рядовой процесс, но, чтобы науке до этого дорасти, предстоит преодолеть много проблем и принять соответствующие решения.



Рис. 5. Награждение грамотой студента ДонНТУ А.Д. Сметанникова



Рис. 6. Участники выставки с ректором ДонНТУ А.Я. Аноприенко

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

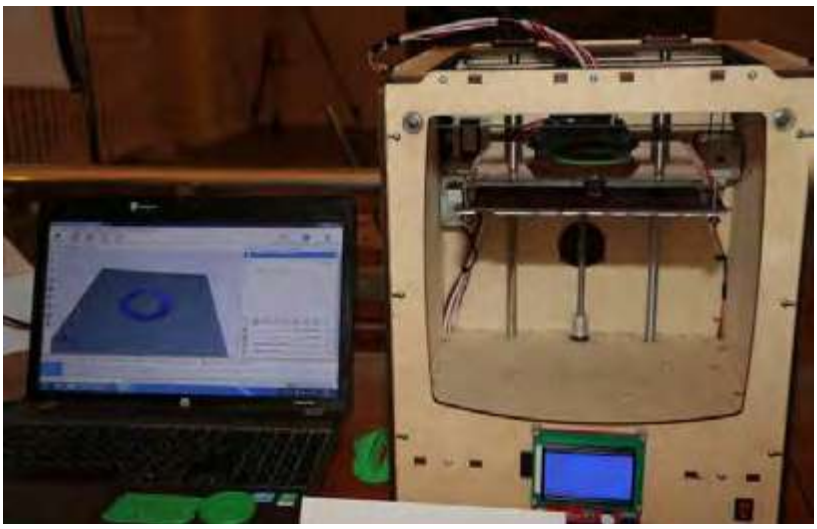


Рис. 7. Разработка студента ДонНТУ В.В. Якушева 3D-принтер, 2019 г.



Рис. 8. Награждение В.В. Якушева

Основная проблема развития и внедрения аддитивных технологий связана с точностью воспроизведения всех свойств, дающих четкую и качественную 3D-печать, устранением погрешностей готовых трехмерных моделей т.д. Несмотря на это, талантливые и перспективные студенты ДонНТУ ищут партнеров, инвесторов и спонсоров, которые заинтересованы в продвижении новейших разработок в Республике

Сегодня развитие науки в Республике – задача важная и срочная, согласно матрице Эйзенхауэра [1]. И если этого не сделать сейчас, мы сами себя вытесним из мирового научного сообщества. Технологии возникают быстрее, чем мы успеваем к ним адаптироваться, поэтому важно самим постоянно учиться и поддерживать молодых ученых. ДонНТУ как передовое инженерное образовательное учреждение заинтересовано в индивидуальной образовательной траектории и максимальном выявлении талантов. Руководство университета понимает, что в новом мире выживут только те, кто способен на самостоятельность в обучении, креативность, решение комплексных задач и работу в команде.

Список литературы

1. Гений, А.А. Высокоэффективный тайм-менеджмент по Матрице Эйзенхауэра. – М.: АСТ, 2016. – 320 с.

Сведения об авторе
В.В. Колосова
Телефон: +380 (71) 434-01-43
Эл. почта: vladi.kolosova@gmail.com

Статья поступила 06.06.2019 г.
© В.В. Колосова, 2019

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 621.867

Е.М. Арефьев /к.т.н./, С.А. Матвиенко /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Рассмотрены виды очистных устройств ленточных конвейеров, определены тенденции развития средств очистки конвейерных лент, рассмотрен вопрос определения контактной жесткости конвейерной ленты при ее взаимодействии с роликовым рабочим органом виброочистного устройства.

Ключевые слова: *конвейерная лента, вибрационная очистка, контактная жесткость, рабочий орган очистного устройства.*

Постановка проблемы

Во всех промышленных отраслях активно используются подъемно-транспортные машины непрерывного действия, особенно в перерабатывающих отраслях и горнодобывающей промышленности. Наиболее эффективными и высокопроизводительными средствами непрерывного транспорта в горной промышленности являются ленточные конвейеры. Очистка ленты от налипающей на нее горной массы является одной из важнейших операций при эксплуатации ленточных конвейеров на горных предприятиях. Неудовлетворительная очистка ленты вызывает ее повышенный износ, увеличение количества аварийных остановок, приводит к интенсивному загрязнению подконвейерного пространства просыпью транспортируемого груза, очистка которого является трудоемкой (около 25 % объема ручных работ по обслуживанию конвейеров) и небезопасной (около трети всех несчастных случаев на предприятиях горной промышленности) операцией. Конвейерный транспорт характеризуется такими недостатками, как износ рабочих элементов конвейера (роликов и ленты конвейера). Замена ленты и роликов требует больших технологических и экономических затрат.

Причиной износа рабочих элементов конвейера является налипание на ленту транспортируемого материала, который в процессе эксплуатации скапливается на поддерживающих роликах, что, соответственно, препятствует их вращению. Следствием остановки роликов может быть сход ленты. Лента конвейера с налипшим слоем «стачивает» поддерживающие ролики, а ролики срезают рабочий слой ленты [1]. Данная проблема решается за счет своевременной очистки ленты в процессе эксплуатации конвейера, что оказывает значительное влияние на уменьшение эксплуатационных затрат и значительно увеличивает срок службы всего оборудования [2].

Эффективность работы средств очистки конвейерных лент, используемых в горнодобывающей промышленности, в основном составляет от 35 % до 50 %, что не соответствует современным требованиям.

Низкое качество очистки ленты приводит к заштыбовке подконвейерного пространства, децентрированному движению и повышенному износу конвейерной ленты.

Работа очистителя ленты в оптимальном режиме позволяет увеличить срок службы конвейерной ленты, повысить надежность работы роликоопор, сократить простой, расход электроэнергии и трудозатраты.

Анализ известных устройств для очистки лент позволяет сделать вывод о том, что вибрационные очистители являются наиболее перспективными. Их применение позволяет увеличить срок службы конвейерной ленты до 45…80 % по сравнению со скребковыми очистителями. Вибрационные очистители конвейерных лент обладают следующими достоинствами: отсутствие изнашивания рабочей обкладки конвейерной ленты и рабочего органа очистителя, снижение коэффициента сопротивления движению конвейерной ленты, постоянная во времени степень очистки ленты, выведение рабочего органа очистителя из загрязненной зоны и т.п.

Для корректного математического описания процесса виброочистки необходимо учитывать контактные взаимодействия рабочего органа очистителя и ленты.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Анализ последних исследований и публикаций

Среди очистных устройств конвейерных лент наибольшее распространение получили скребки, технические щетки, роликовые и вибрационные, гидравлические и пневматические очистители, механизмы переворота ленты для очистки ее обратной стороны [3…8]. Применяемые очистительные устройства должны обеспечивать полную очистку ленты и максимальную сохранность очищаемой поверхности.

Наиболее распространенными средствами очистки конвейерных лент являются скребковые очистители. Изнашивание рабочей поверхности скребка происходит неравномерно и зависит от вида транспортируемого материала. При транспортировке относительно сухого абразивного материала влажностью до 8 % у скребка изнашивается средняя часть рабочей поверхности. При очистке лент от пластичного влажного материала наибольший износ наблюдается по краям скребка. Из-за неплотного прилегания скребка к ленте, из-за изнашивания в процессе эксплуатации между рабочей поверхностью и конвейерной лентой остается незначительная часть материала.

Сложность решения проблемы качественной очистки ленты заключается в следующем: в литературе по подъемно-транспортным машинам непрерывного действия данной проблеме уделяется мало внимания; на данный момент промышленность не изготавливает серийно эффективные устройства для очистки лент, а поставляемые в комплекте с конвейерами, не соответствуют современным требованиям к качеству очистки ленты; требования на проектирование конвейерных систем предусматривают мероприятия по соблюдению чистоты подконвейерного пространства; отсутствует единая методика оценки эффективности очистных устройств; профилактика заштыбовки конвейеров и ее последствий после огибания лентой разгрузочного барабана является низкоэффективной.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является установление коэффициента контактной жесткости при взаимодействии цилиндрического рабочего органа виброочистного устройства с конвейерной лентой.

Основной материал исследования

Реализуемые в процессе виброочистки силы контактного взаимодействия очистителя и ленты не оказывают существенного влияния на ее долговечность [9].

Установлено, что в качестве целевой функции при оптимизации параметров виброочистителей целесообразно использовать сравнительную годовую экономическую эффективность, а в качестве базового варианта принять наиболее распространенные скребковые очистные устройства. Оптимизируемыми параметрами, определяющими качество виброочистки, целесообразно принять частоту возмущения, отношение собственных частот очистителя и ленты, расстояние между осями поворота рамы очистителя и рабочего органа, амплитуду момента силы магнита [10].

Современная очистка конвейерных лент основывается на положениях [11,12]:

1. Современные технические средства очистки лент действуют по принципу сдвига или отрыва налипающего слоя от ленты.

2. Технико-экономическим анализом дедуктивной классификации установлено, что на современном этапе развития техники и технологий наиболее целесообразна очистка лент твердоэлементным устройством секционного типа очистных элементов.

3. Для достижения высокой степени очистки ленты необходимо и достаточное соотношение действующих на элемент сил:

$$P_э \geq P_\beta + P_h + P_m, \qquad (1)$$

где $P_э$ – сила поджатия элемента и ленты, Н; P_β – сила, обусловленная давлением и перемещением потока породы по встречной плоскости элемента, Н; P_h – сила, обусловленная расклинивающим давлением потока породы в зазоре между элементом и лентой, Н; P_m – сила тяжести элемента с учетом его брутто-массы с налипшей породой, Н.

На силу поджатия элемента и ленты оказывает влияние контактная жесткость ленты. Определение коэффициента контактной жесткости при взаимодействии рабочего органа очистителя с лентой проводилось на специальном стенде. Схема стенда для экспериментального определения зависимости глубины деформации от силы, с которой рабочий орган воздействует на ленту, представлена на рис. 1.

Фрагмент конвейерной ленты располагался на ровном твердом основании. На ленте устанавливался роликовый рабочий орган виброочистителя. К верхней образующей рабочего органа в двух крайних точках прикладывались штоки индикаторов часового типа ИЧ10 ГОСТ 577-68. Сами индикаторы были зафиксированы относительно твердого основания, на котором располагался фрагмент ленты. Фактором эксперимента явля-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

лась сила, с которой рабочий орган воздействует на ленту, $P_{кжс}$. Откликом системы при изменении фактора являлась глубина деформации $\Delta_{кжс}$.

Требуемое значение силы $P_{кжс}$ создавалось путем подвешивания к оси роликового рабочего органа виброочистителя груза весом $P_{кжс.гр}$ и с учетом веса рабочего органа $P_{р.о}$ составляло:

$$P_{кжс} = P_{кжс.гр} + P_{р.о}\,. \qquad (2)$$

Затем фиксировались показания индикаторов часового типа, соответственно, первого, $\Delta_{кжс1}$, и второго, $\Delta_{кжс2}$, и определялось их среднее значение: $\Delta_{кжс}=\Delta_{кжс1}+\Delta_{кжс2}$.

Результаты экспериментальных исследований и линия уравнения регрессии связи глубины деформации ленты $\Delta_{кжс1}$ с силой, действующей на рабочий орган очистителя $P_{кжс}$, представлены на рис. 2.

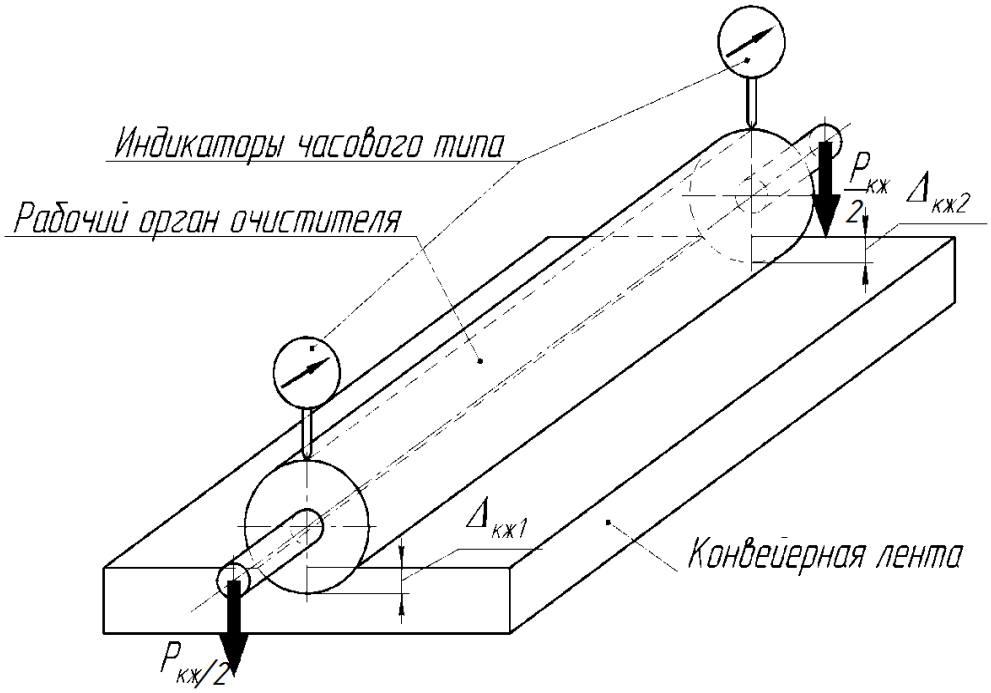


Рис. 1. Схема стенда для экспериментального определения зависимости глубины контактной деформации ленты от приложенной к ролику силы

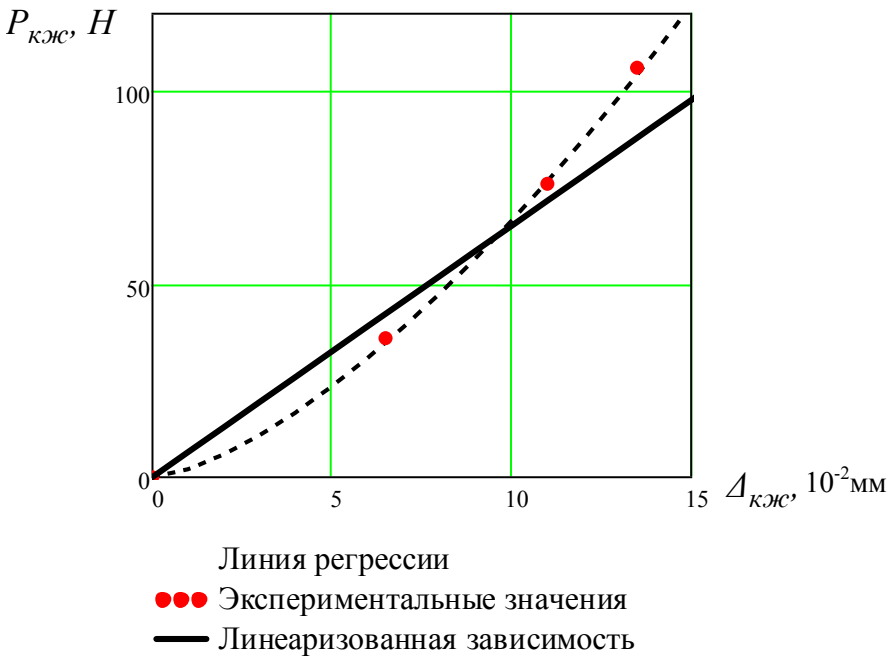


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований и линия уравнения регрессии связи глубины деформации ленты $\Delta_{кжс}$ с силой $P_{кжс}$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Согласно [12] при соприкосновении тел конечных размеров зависимость между силой $P_{кж}$ и глубиной деформации $\Delta_{кж}$ можно представить в виде:

$$P_{кж} = c_1 \Delta^{1,5}_{кж.\max}, \quad (3)$$

где c_1 – коэффициент уравнения регрессии.

Коэффициент уравнения регрессии определялся методом наименьших квадратов и составил: c_1=2,1. Значение критерия Фишера [13] меньше табличного при уровне значимости α_f=0,05, следовательно, полученное уравнение регрессии адекватно экспериментальным данным.

Для того чтобы применить линейную модель Гука к описанию процесса взаимодействия рабочего органа очистителя, требуется провести линеаризацию уравнения Герца. Такая линеаризация может проводиться из условия равенств работы деформирования и максимального внедрения при степенном, $A_{ст}$, и линейном, $A_л$, законах деформирования в диапазоне рабочих деформаций $\Delta_{кж}$=0…$\Delta_{кж.\max}$ [14].

$$A_{ст} = \int_0^{\Delta_{кж.\max}} c_1 \Delta^{1,5}_{кж} d\Delta_{кж}, \quad (4)$$

$$A_л = \int_0^{\Delta_{кж.\max}} c_{кж} \Delta_{кж} d\Delta_{кж}. \quad (5)$$

Приравнивая выражения (4) и (5), можно определить коэффициент контактной жесткости:

$$c_{кж} = 0{,}8\Delta^{0,5}_{кж.\max}. \quad (6)$$

Значение коэффициента контактной жесткости составило 650 Н/мм.

Выводы

Таким образом, получена зависимость контактной жесткости конвейерной ленты при ее взаимодействии с роликовым рабочим органом вибрационного очистителя.

Эта зависимость может быть использована при моделировании процесса вибрационной очистки.

Список литературы

1. Устройства для очистки лент конвейеров в СССР. Обзор / Г.С. Ненахов [и др.]. – М.: ВНИИПИ, 1985. – 60 с.
2. Ленточные конвейеры / И.М. Тарасов. – М: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной и судостроительной литературы, 1963. – 216 с.
3. Конвейеры. Справочник / Р.А. Волков [и др.], под общ. ред. Ю.А. Пертена. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 367 с.
4. Тарасов, Ю.Д. Очистка подконвейерного пространства на предприятиях нерудной промышленности. – Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1983. – 192 с.
5. Maintenance, diagnostics and safety of belt conveyors in the operations / M. Hardygora et al. // Transport & Logistics. – 2009. – No.6. – P. 351-354.
6. A maintenance strategy for drive units used in belt conveyors network / R. Zimroz et al. // 22nd World Mining Congress & Expo., Istanbul, September 11-16. – 2011.Vol.1. – P. 433-440.
7. Mazurkiewicz, D. Computer system for monitoring conveyor belt joints // Canadian Mining Journal. – 2007. – No.5. – P. 23-24.
8. Николаев, Е.Д. Теоретические, экспериментальные и практические исследования очистки конвейерных лент / Е.Д. Николаев, Л.С. Костерин, В.П. Дмитрин // Горный журнал. – 2000. – №4. – С. 45-49.
9. Кондрахин, В.П. Оценка влияния виброочистки на срок службы конвейерной ленты / В.П. Кондрахин, Е.М. Арефьев, Н.В. Хиценко // Вестник ХНАДУ. – 2012. – Вып.57. – С. 292-295.
10. Чаплыгин, В.В. Практичная теория очистки конвейерных лент / В.В. Чаплыгин, Е.Д. Николаев // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2015. – №2(12). – С. 9-18.
11. Николаев, Е.Д. Создание эффективного очистителя конвейерных лент от налипающих пород: автореф. дис…. канд. техн. наук: 05.05.06 / Николаев Евгений Дмитриевич. – Новосибирск, 1991. – 17 с.
12. Тимошенко, Г.М. Теория инженерного эксперимента: учебное пособие / Г.М. Тимошенко, П.Ф. Зима. – Донецк: ДПИ, 1984. – 60 с.
13. Будишевский, В.А. Сравнительный анализ технологий очистки конвейерных лент / В.А. Будишевский, Е.М. Арефьев // Вести Донецкого горного института. – 2009. – №2(30). – С. 47-53.
14. Коваль, А.В. О жесткости конвейерной ленты при изгибе / А.В. Коваль, А.С. Овсянников, И.А. Шпакунов // М.: Недра, 1970. – Вып.11. – С. 77-80.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

I.M. Ariefiev /Cand. Sci. (Eng.)/, S.A. Matvienko /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE CONTACT RIGIDITY COEFFICIENT OF THE CONVEYOR BELT OF CONTINUOUS ACTION CONVEYING MACHINES

Background. *The process of the belt cleaning from the stuck rock mass is of great importance for the operational reliability of belt conveyors. The low quality of the belt cleaning causes its increased wear, the increase in the number of emergency stops, intensive contamination of the sub-conveyor space. The quality of the belt cleaning is affected by the force of the element compression directly dependant on the contact rigidity of the belt.*
Materials and/or methods*. The experiment carried out according to the following scheme. A fragment of the conveyor belt located on a flat solid base. The roller working body of vibrational cleaner installed on the belt. The rods of the dial indicators applied to the upper generatrix of the working body in its two final points. The indicators fixed on a solid base on which a fragment of the belt was based. The factor of the experiment was the effect of the working body on the belt. The response of the system when the factor changed was the depth of the deformation. The required value of force was created by hanging load to the axis of the roller working body of the vibration cleaner. Further, the average value of the indicators determined.*
Results. *The coefficient of the regression equation determined by the method of least squares and was* c_1*=2.1. The contact stiffness coefficient was 650 N/mm.*
Conclusion. *The dependence of the contact stiffness of the conveyor belt in its interaction with the roller working body of the vibration cleaner obtained. This dependence can be used in the simulation of the vibration cleaning process.*

Keywords: *conveyor belt, vibration cleaning, contact stiffness, working body of the cleaning device.*

Сведения об авторах

Е.М. Арефьев
SPIN-код: 2201-2812
Телефон: +380 (71) 387-34-15
Эл. почта: elcross@mail.ru

С.А. Матвиенко
SPIN-код: 5117-2172
Телефон: +380 (71) 367-80-09
Эл. почта: serge-matvienko@yandex.ru

Статья поступила 28.02.2019 г.
© Е.М. Арефьев, С.А. Матвиенко, 2019
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 622.232.72.063

П.П. Зинченко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ТЕНДЕНЦИИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ ДЛЯ ТОНКИХ ПОЛОГОНАКЛОННЫХ ПЛАСТОВ

На основе анализа литературных источников установлено, что одним из главных факторов, ограничивающих возможность интенсификации выемки угля в условиях тонких пластов, является погрузочная способность исполнительных органов очистных комбайнов. Показано, что одним из перспективных путей повышения производительности очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов является оптимизация геометрических параметров их исполнительных органов или конструкции комбайна в целом. Обосновано дальнейшее направление повышения погрузочной способности шнека путем оптимизации ширины захвата исполнительного органа.

Ключевые слова: *погрузка, удельные энергозатраты, оптимизация параметров, шнек, погрузочная способность.*

Постановка проблемы

Главным энергетическим ресурсом, способным полностью удовлетворить потребности экономики и промышленности Донецкого региона является каменный уголь, запасы которого, по данным ДонУГИ, составляют порядка 6,84 млрд. т. Основная часть этих запасов (порядка 83,2 %) сосредоточена в пластах мощностью 0,55…1,2 м [1]. Добыча угля из пластов малой мощности может считаться эффективной лишь при использовании струговых комплексов, однако условия применения стругов весьма ограничены. Так, из 1092 шахтопластов нашего региона всего лишь 127 пригодны для струговой выемки [1], что свидетельствует о невозможности широкого их использования для добычи угля. В связи с этим для выемки угольных пластов нашего региона наиболее широко применяются очистные комбайны в составе механизированных комплексов.

Процесс добычи угля выемочными комбайнами в условиях тонких пологонаклонных пластов существенно затрудняется недостаточной погрузочной способностью шнековых исполнительных органов, что ограничивает скорость подачи комбайна на уровне 3…5 м/мин и, как следствие, обуславливает низкую производительность и высокие удельные энергозатраты его работы [2…4].

Таким образом, дальнейшие исследования в области проектирования и конструирования очистных комбайнов нового технического уровня, способных эффективно работать в условиях тонких пологонаклонных пластов, являются весьма актуальной проблемой угольного машиностроения нашего региона.

Анализ последних исследований и публикаций

Вопросам повышения эффективности работы очистных комбайнов посвящено множество отечественных и зарубежных работ [5…13]. Решение вопроса оптимизации параметров шнековых исполнительных органов по критерию повышения производительности очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов изложено в работах [5…9]. Авторами работ [10…12] проведены исследования в области интенсификации добычи угля из тонких пологонаклонных пластов с последующей разработкой конструкций очистных комбайнов, оснащенных исполнительными органами, выполняющими только функцию разрушения горного массива. Работа [13] посвящена снижению энергоемкости работы очистных комбайнов в условиях тонких пологонаклонных пластов путем разработки системы автоматического управления очистными комбайнами по критерию отсутствия заштыбовки исполнительного органа.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является обоснование эффективных путей повышения производительности очистных комбайнов, работающих в условиях тонких пологонаклонных пластов.

Основной материал исследования

Как отмечено выше, проблеме увеличения производительности очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов посвящено множество работ как отечественных, так и зарубежных авторов [5…23].

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В работе [5] впервые выявлена физическая картина и разработаны основные положения теории процесса выгрузки угля на лавный конвейер шнековым исполнительным органом очистного комбайна для тонких пологонаклонных пластов. Показано, что в течение оборота шнека при выгрузке угля на конвейер имеются паузы, которые уменьшают производительность исполнительного органа по погрузке. Автором установлено, что при выгрузке угля двухзаходным шнеком диаметром 0,63 м, установленным на комбайне типа К-103, при работе его со скоростью подачи 4 м/мин и более, продолжительность пауз составляет 40…60 % от длительности оборота шнека. При этом существенное влияние на процесс погрузки оказывает направление вращения шнека. Так, при вращении шнека от почвы к кровле значение мощности на погрузку снижается до 50 % в сравнении с мощностью на погрузку при вращении шнека от кровли к почве. Анализ данной работы показал, что в своих исследованиях автор не учитывает специфики работы очистных комбайнов с вынесенным корпусом на забойную часть, вследствие чего интенсивно формируется напряженное состояние погружаемого угля в шнеке.

Работа [6] нацелена на повышение производительности очистных комбайнов со шнековыми исполнительными органами в условиях тонких пластов за счет применения шнеков с переменным шагом навивки погрузочных лопастей с рациональными параметрами. Автор доказал, что выгрузка угля шнеками очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов происходит в условиях его объемного напряженного состояния, характеризующегося давлением на лопастях шнеков до 0,1 МПа. Следствием напряженного состояния угля является недостаточная производительность и повышенные удельные энергозатраты выгрузки равные 0,33…0,4 кВтч/т для шнеков с постоянным шагом навивки лопасти. Экспериментально установлено, что шнеки диаметром 0,56 м с переменным шагом навивки лопастей обеспечивают повышение погрузочной способности на 43…64 % в диапазоне изменения частоты вращения 80…160 об/мин и снижение удельных энергозатрат погрузки в 1,8…1,9 раза по сравнению со шнеками с постоянным шагом навивки лопастей. При этом автор не исследовал влияние увеличения угла наклона лопасти у разгрузочного торца на метательную способность шнека.

Работа [7] посвящена дальнейшей разработке теории динамического пространственного уравновешивания и определению рациональных значений параметров шнековых исполнительных органов очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов, обеспечивающих повышение производительности шнеков по выгрузке на 25…35 %, а также их ресурса в 1,3…1,5 раза. Установлено, что доля нагрузки, формирующейся в зоне, прилегающей к разгрузочному торцу шнека, составляет 55…65 % от общего уровня нагрузки. При этом автор в своей работе не предусматривает уменьшение напряженного состояния выгружаемого угля.

В работе [8] предложена теория погрузки угля шнековыми и барабанными с вертикальной осью вращения исполнительными органами, новизна которой заключается в учете нарастающего в направлении выгрузки характера заполнения рабочего органа разрушенным углем, его напряженного состояния, циркуляции и отставания выгружаемого угля от перемещения погрузочных элементов. Учет указанных факторов позволяет обосновать и определить рациональные параметры исполнительных органов очистных комбайнов для выемки угля из тонких пологонаклонных пластов, обеспечивающих повышение погрузочной способности до 60 %. На основе предложенных рекомендаций созданы высокопроизводительные и малодинамичные исполнительные органы очистных комбайнов, способные повысить среднюю скорость подачи комбайна в 1,6…1,8 раза. Анализ данной работы показывает, что автор исследовал обособленное влияние режимных и некоторых геометрических параметров исполнительного органа, но не исследовал их комплексное влияние на процесс погрузки угля и на механизированный комплекс в целом.

Автор работы [9] решает задачу повышения производительности очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов со шнековыми исполнительными органами путем воздействия на выгружаемую горную массу струями рабочей жидкости. Автором разработаны основы теории рабочих процессов шнековых систем активной выгрузки угля, базирующейся на предложенной интегральной математической модели их функционирования. Математическая модель процесса впервые основана на представлении выгружаемого шнеком угля в виде сплошного несжимаемого потока, подверженного активирующему воздействию и преодолевающего сопротивление окна выгрузки. На основе выполненных натурных и вычислительных экспериментов автором разработана методика расчета и выбора оптимальных параметров механо-гидродинамических систем активной выгрузки угля, обеспечивающих повышение погрузочной способности очистных комбайнов в 2…3 раза при снижении удельных энергозатрат погрузки в 2 раза. При этом автор не учитывает изменение поведения транспортируе-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

мой горной массы при повышении ее влажности.

В работах [10…12] предложено изменить подход к транспортированию разрушенной горной массы и, тем самым, отказаться от погрузки разрушенного угля исполнительными органами.

Автор работы [10] предоставляет новое научно обоснованное техническое и технологическое решение, нацеленное на повышение эффективности технологии очистных работ на тонких угольных пластах с использованием машин БВМ. Разработана новая конструкция барабанно-дискового исполнительного органа выемочного типа с шириной захвата 0,31 м, оснащенного специальными карманами для эффективной центробежной выгрузки разрушенного угля на берму. Предложенное конструктивное решение исполнительного органа позволяет обеспечить высокоинтенсивную (со скоростью подачи комбайна до 21 м/мин) энергосберегающую технологию выемки тонких пластов с сопротивляемостью угля резанию до 300 кН/м. При этом погрузку разрушенного угля на лавный конвейер автор предлагает выполнять путем самонавалки при скалывании нижней пачки угля, что может повлечь за собой увеличение габаритов гидродомкратов передвижки крепи. Кроме того, не до конца понятно, каким образом указанный способ проявит себя в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях работы.

В работе [11] обосновано иное, схожее с предыдущим, направление развития очистных комбайнов для выемки тонких пластов на основе создания высокоскоростных добычных агрегатов, отличающихся от существующих многократным увеличением скорости подачи комбайна до 30 м/мин и скоростью резания до 10 м/с. В качестве исполнительного органа предложен диск с шириной захвата 0,3 м, прорубывающий щель в горном массиве с последующим вибрационным воздействием режущего инструмента на разрушаемый массив. Исполнительный орган такого типа предназначен только для разрушения угля, функцию погрузки осуществляет скребковый конвейер, оснащенный специальным погрузочным лемехом. Прирост производительности при описанной компоновке рабочего органа в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий эксплуатации составляет 2,5 раза в сравнении с комбайнами, оснащенными шнековыми исполнительными органами. Однако увеличение скорости резания до 10 м/с может привести к значительному снижению ресурса режущего инструмента и искробезопасности предложенного исполнительного органа, а вибрационное воздействие на массив с целью более эффективного скалывания негативно отразится на элементах трансмиссии машины.

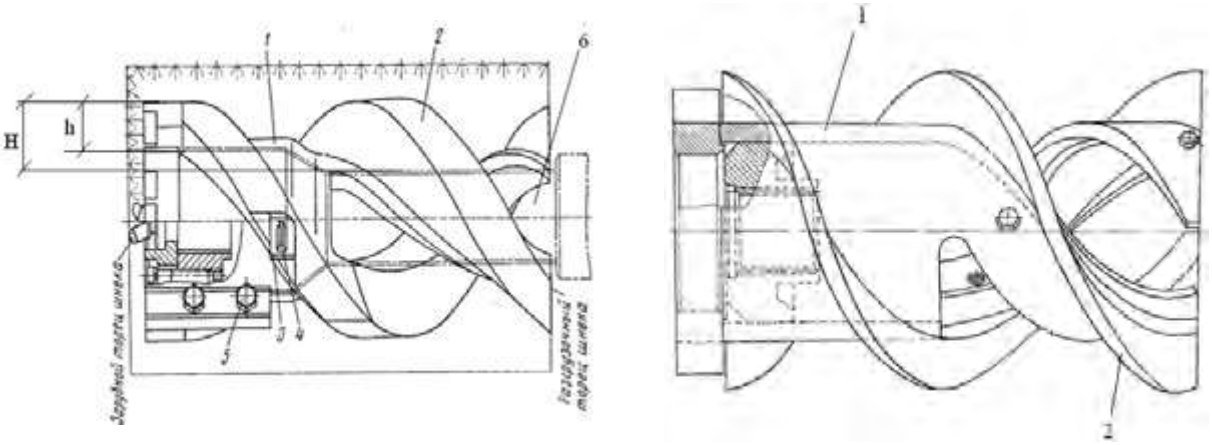
В работе [12] автор предлагает конструкцию очистного комбайна с одним исполнительным органом, оснащенным лопастями с окнами для ссыпания разрушенной горной массы на почву пласта. Погрузка при этом осуществляется специальными погрузочными лемехами, установленными по концам машины. Предложенная компоновка комбайна с одним исполнительным органом предполагает специфическую конструкцию редуктора резания без возможности регулирования высоты подъема исполнительного органа по мощности пласта, что ограничивает область применения этой машины по горно-геологическим и горнотехническим условиям эксплуатации, приравнивая ее к струговым комплексам.

Работа [13] посвящена разработке системы управления режимными параметрами очистных комбайнов по критерию минимальных энергетических затрат на работу комбайна в условиях тонких пологонаклонных пластов на основе установления докритических режимных параметров работы комбайна по условию отсутствия заштыбовки шнека. Автор доказал, что при переходе к предложенному им способу автоматического управления режимами работы комбайна объем циркулирующего угля в рабочем пространстве шнека уменьшается в 3 раза, за счет чего удельные энергозатраты на добычу угля снижаются на 40…50 %. При этом автор не учитывает фактического уменьшения рабочего объема шнека при циркуляционных процессах, что вносит значительную погрешность в результаты исследований.

На основе результатов исследований, полученных в ходе решения научно-технических проблем, поставленных перед зарубежными и отечественными учеными, получено множество патентов на изобретения и авторских свидетельств [14…23].

Техническое решение [14,15] предусматривает увеличение погрузочной способности шнекового исполнительного органа за счет консольного закрепления лопасти с резцами на ступице шнека. Так, в авторском свидетельстве [14] исполнительный орган (рис. 1а) состоит из разъемной ступицы 1, погрузочных лопастей 2, резцедержателей 3 с резцами 4 и стягивающих болтов 5. Погрузка лопасти выполнена ступенчатой, и ее высота со стороны зарубного торца равна h, а в его разгрузочной части увеличивается до величины H, что обеспечивается ступенчатой формой корпуса привода 6 и отсутствием ступицы и разгрузочной части шнека. Вращающиеся консольные лопасти перемещают материал вдоль не вращающейся цилиндрической поверхности корпуса 6.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

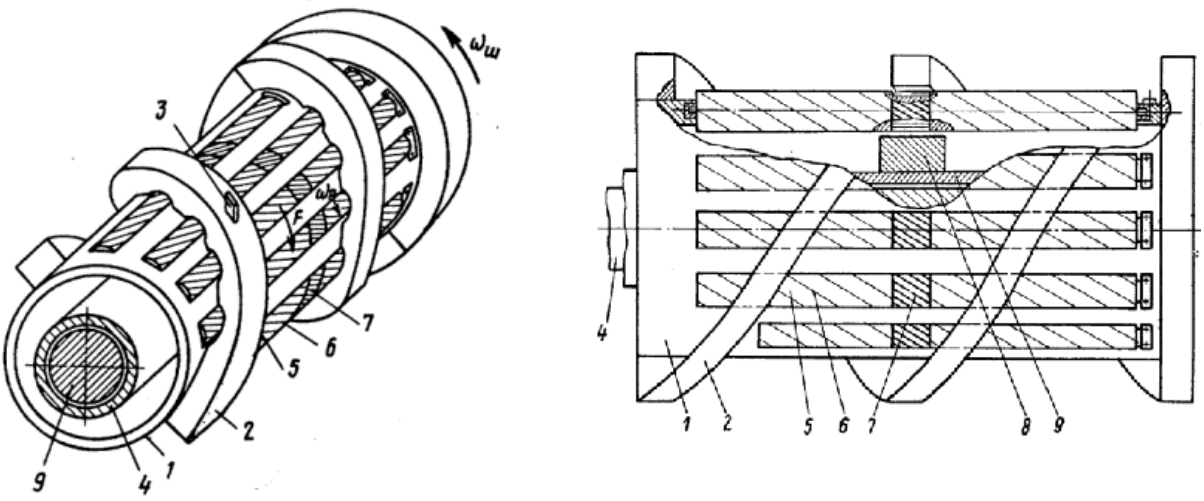
Рис. 1. Шнековый исполнительный орган:
а – А.С. 1640682/22-3 с консольными лопастями;
б – А.С. 2497105/22-03 с консольными лопастями

Исполнительный орган, описанный в авторском свидетельстве [15], является модификацией шнека [14] и отличается от него отсутствием разъемной ступицы, что улучшает погрузку, а также исключает болты крепления половинок шнека, воспринимающие усилия от разрушения горного массива и, как следствие, быстро выходящие из строя. Общий вид шнека представлен на рис. 1б.

Одно из направлений увеличения погрузочной способности изложено в авторских свидетельствах [16…18]. Увеличение погрузочной способности происходит за счет дополнительного механического воздействия на выгружаемую горную массу.

Предложенная авторами [16] конструкция шнека представлена на рис. 2. Повышение погрузочной способности достигается за счет снижения циркуляции угля в межлопастном пространстве шнека путем вращения роликов, оси которых ориентированы параллельно оси вращения шнека, при этом насечка на роликах выполнена в направлении, перпендикулярном транспортирующей поверхности лопасти. Шнек состоит из ступицы 1, на которой закреплены лопасти 2 с резцами 3. Ступица установлена на выходном валу 4 редуктора привода и снабжена роликами 5. Ролики 5 связаны через зубчатую передачу шестерен 7 и 8 с корпусом 9 редуктора привода.

Конструкция шнека [17] представлена на рис. 3. Повышение погрузочной способности шнека достигается за счет увеличения осевой скорости движения потока выгружаемой горной массы. Шнековый исполнительный орган состоит из полой ступицы 1, на которой закреплены лопасти 2 с резцедержателями 3 и резцами 4. Полая ступица 1 установлена на выходном валу 5 редуктора привода резания.



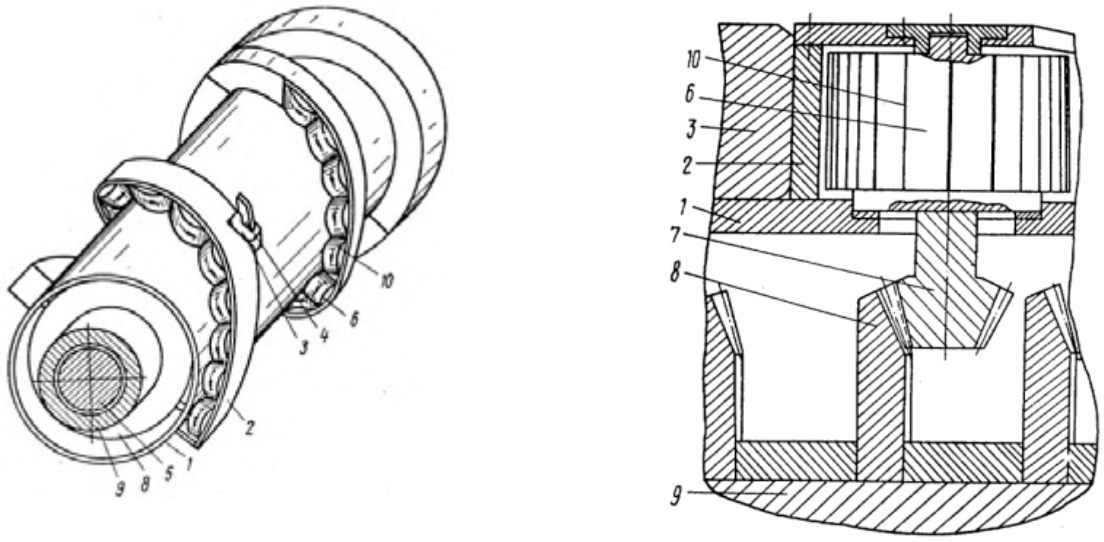
а б

Рис. 2. Шнековый исполнительный орган с дополнительными погрузочными устройствами:
а – общий вид; *б* – вид сбоку с местным вырезом по оси одного из роликов

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

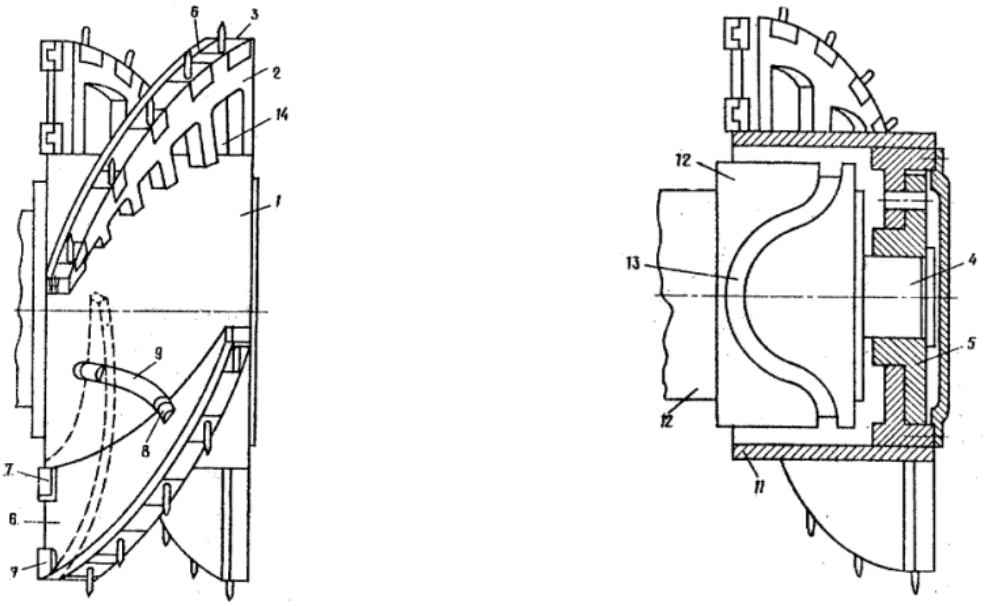
Лопасти 2 снабжены роликами 6, оси вращения которых перпендикулярны оси вращения шнека. На оси каждого ролика 6 в полости ступицы 1 жестко установлена шестерня 7, взаимодействующая с соответствующим зубчатым колесом 8, жестко установленным на корпусе 9. Каждый ролик 6 выполнен с ребрами 10, параллельными оси вращения этого ролика.

Авторское свидетельство [18] нацелено на повышение погрузочной способности шнекового исполнительного органа и предотвращение переизмельчения погружаемой горной массы за счет оснащения шнека подвижными лопастями, которые в процессе поворота шнека будут менять свое положение. Исполнительный орган (рис. 4) состоит из ступицы 1 с жестко закрепленными лопастями шнека 2 с резцами 3. Ступица связана с валом редуктора 4 шлицевой втулкой 5. Каждая лопасть оснащена поворотным лемехом 6, соединенным с лопастью 2 шарнирами 7 и имеет ролик 8, проходящий в прорезь 9. На корпусе редуктора 10 с помощью болтов 11 крепится втулка 12 с фигурной направляющей замкнутой канавкой 13. Окна 14 служат для пропуска угля через лопасть при возврате лемеха в начальное положение.



а б

Рис. 3. Шнековый исполнительный орган с дополнительными погрузочными устройствами: *а* – общий вид; *б* – сечение ролика перпендикулярной к оси вращения шнека плоскостью, проходящей через ось ролика



а а

Рис. 4. Шнековый исполнительный орган: *а* – общий вид; *б* – сечение шнека плоскостью, проходящей через ось исполнительного органа

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В авторских свидетельствах [19,20] предложен способ повышения производительности очистного комбайна за счет переноса рукояти поворотного редуктора резания на забойную часть комбайна.

Общий вид очистного комбайна предложенной конструкции [19] приведен на рис. 5.

Данный очистной комбайн (рис. 5) состоит из исполнительных органов 1 и 2, расположенных по концам его корпуса 3, в котором расположены электродвигатели 4 и 5. Каждый исполнительный орган комбинированный и состоит из отрезного барабана 6, установленного на поворотном редукторе 8.

Конструкция комбайна, предложенного в [20], отличается от предложенной в [19] установкой исполнительных органов под углом к разрушаемому массиву, за счет чего достигается повышение погрузочной способности исполнительных органов. Общий вид очистного комбайна [20] представлен на рис. 6. Очистной комбайн включает в себя корпус 1, расположенный с забойной стороны конвейера 15, погрузочный щиток 14, двигатели 2 и редукторы 3, связанные с зубчатыми передачами 4 и 5 наклоненного в сторону забоя редуктора 6 со шнеком 7, который шарнирно закреплен на корпусе 1 и в полости 9 содержит входную 10 и выходную 11 пары конических передач, связанных валом 12.

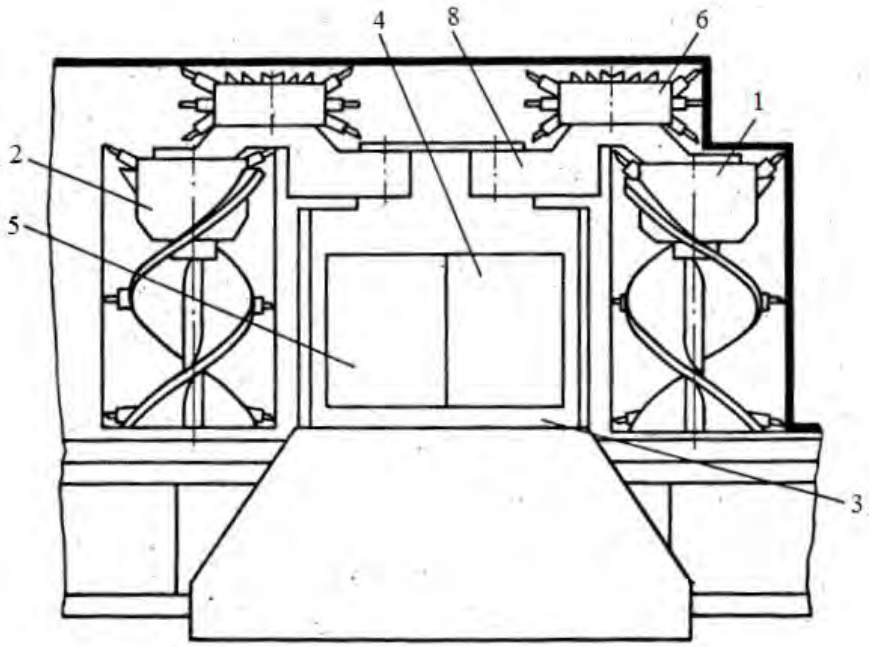


Рис. 5. Общий вид очистного комбайна с перенесенной на забойную часть поворотной рукоятью

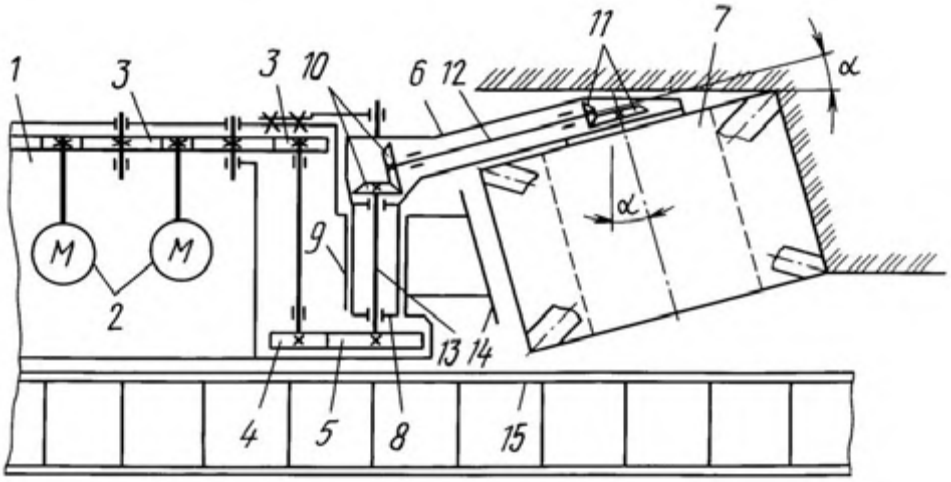


Рис. 6. Общий вид очистного комбайна с противоположным размещением рукояти поворотного редуктора резания с установленным под углом к массиву исполнительным органом

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Технические решения [21,22] направлены на увеличение погрузочной способности очистных комбайнов за счет измененных конструкций поворотных редукторов резания.

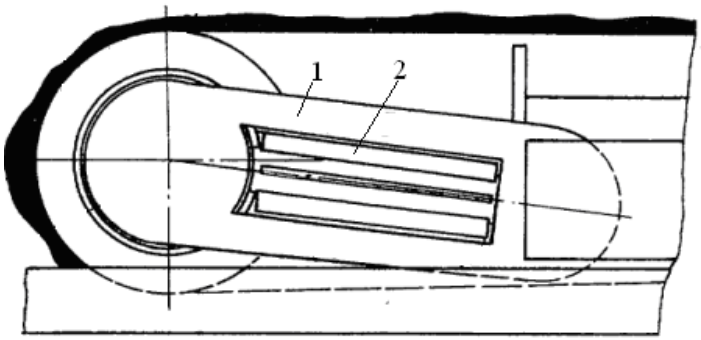
В авторском свидетельстве [21] (рис. 7 а) предложено в специальном окне поворотного редуктора резания 1 разместить дополнительные погрузочные лопатки 2, которые приводятся в движение за счет вращения вала, передающего крутящий момент на вал исполнительного органа для удаления угля из нерабочей части исполнительного органа.

В авторском свидетельстве [22] (рис. 7 б) авторы предлагают оснастить поворотный редуктор резания 1 окнами 2 с определенными геометрическими параметрами для удаления угольной массы с нерабочей стороны шнека.

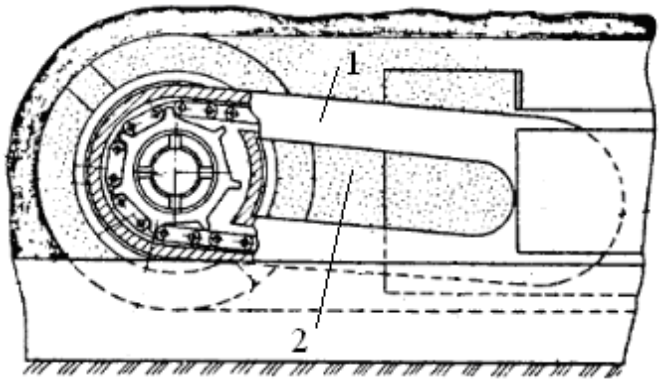
Авторское свидетельство [23] направлено на повышение производительности очистных комбайнов для тонких пластов путем оснащения поворотного редуктора резания 1 специальным туннелем 2 для транспортировки разрушенной горной массы из нерабочей зоны исполнительного органа. Общий вид предлагаемой конструкции очистного комбайна представлен на рис. 8а, конструкция поворотного редуктора – на рис. 8б.

Таким образом, в настоящее время установлены закономерности формирования нагрузки на исполнительный орган очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов от погрузки разрушенного угля на забойный конвейер. На основе установленных зависимостей можно выполнить оптимизацию параметров исполнительных органов очистных комбайнов по критерию максимальной производительности и ресурса очистного комбайна при минимальных значениях энергетических затрат его работы. Предложены конструкции исполнительных органов очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов, позволяющих решить вопрос недостаточной погрузочной способности шнековых исполнительных органов. Вместе с тем, остаются неясными вопросы взаимодействия комбайна с другими машинами механизированного комплекса. Не выявлены закономерности влияния ширины захвата шнека на энергетические параметры работы машины, что делает невозможным полную оптимизацию параметров шнековых исполнительных органов.

Авторы работы [24] установили показательную зависимость мощности погрузки разрушенного угля от скорости подачи комбайна и ширины захвата шнека, а также разработали методику выбора оптимальной ширины захвата шнека на основе предложенной номограммы, разрабатываемой для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий работы.



а



б

Рис. 7. Общий вид поворотного редуктора очистного комбайна:
а – А.с. 3943076/22-03 СССР, МКл Е 21 С 27/02;
б – А.с. 4021976/22-03 СССР, МКл Е 21 С 27/02

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

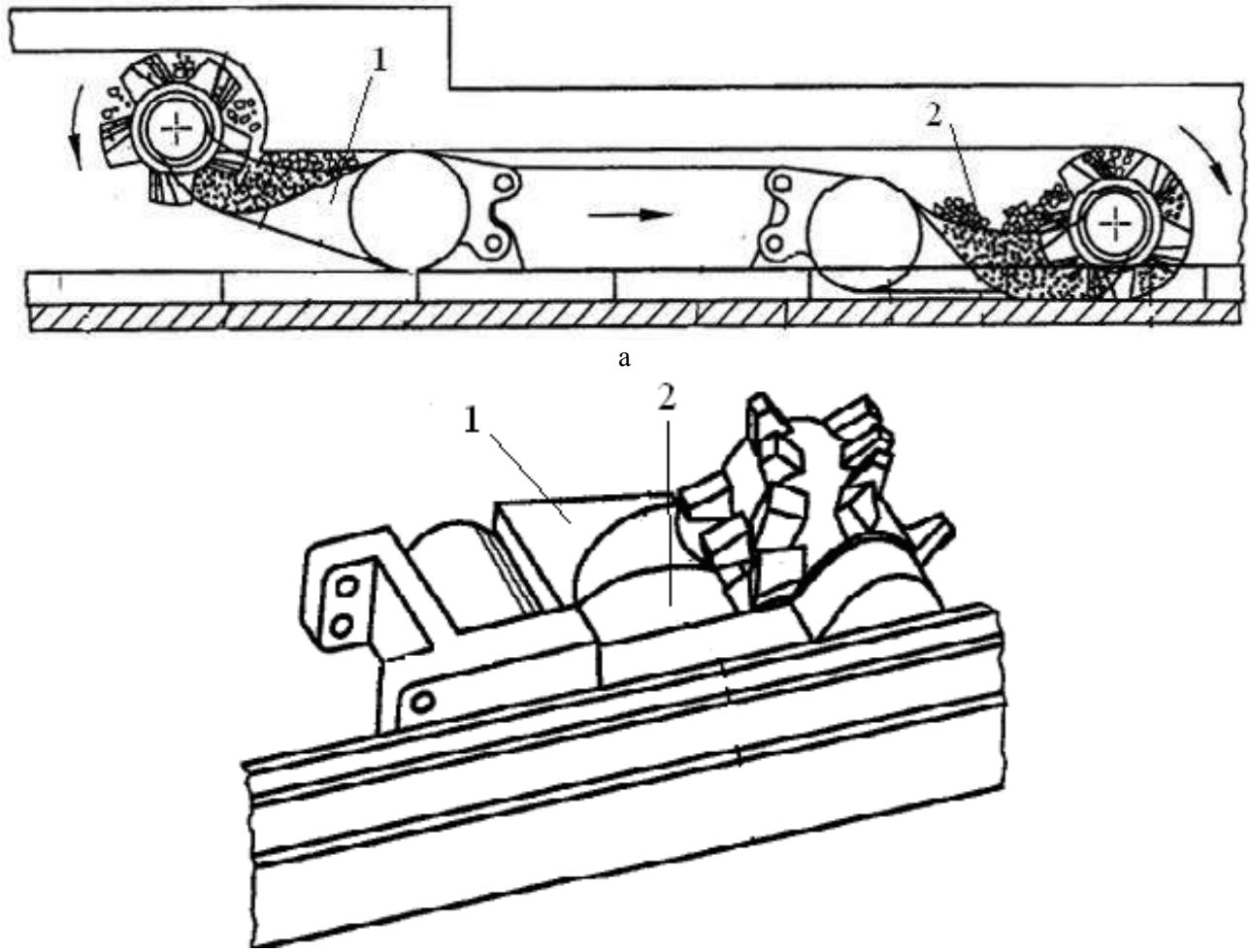


Рис. 8. Очистной комбайн:
а – общий вид; *б* – поворотный редуктор с туннелем для транспортировки разрушенной горной массы

Выводы

Проанализирован ряд фундаментальных работ, связанных с физическими процессами, протекающими в исполнительных органах очистных комбайнов для выемки тонких пологонаклонных пластов в процессе их работы. Установлено, что процесс погрузки разрушенного угля исполнительными органами характеризуется высокой энергоемкостью, а их низкая погрузочная способность является основным ограничивающим фактором производительности очистных комбайнов, работающих в условиях тонких пологонаклонных пластов. Проведенные исследования отечественных и зарубежных ученых, нацеленные на повышение производительности очистных комбайнов, касаются оптимизации геометрических параметров их исполнительных органов по критерию максимальной погрузочной способности. При этом вопрос повышения эффективности процесса погрузки угля шнеками очистных комбайнов, предназначенных для выемки тонких пологонаклонных пластов, остается весьма актуальным и не до конца решенным.

По результатам исследований установлена показательная зависимость мощности на погрузку от скорости подачи и ширины захвата шнека. Показано, что ширина захвата оказывает существенное влияние на процесс выгрузки угля исполнительными органами. Минимальная мощность на разрушение и погрузку обеспечивается при ширине захвата от 0,4 до 0,6 м, что позволяет снизить энергоемкость процесса разрушения и погрузки в 2 раза (с 0,72 до 0,35 кВтч/т). Таким образом, необходимо провести дополнительные исследования, направленные на повышение эффективности процесса погрузки угля для комбайнов, работающих в условиях тонких пластов.

Список литературы

1. Горные машины для подземной добычи угля: Учебное пособие для вузов / П.А. Горбатов и др. / Под общей ред. П.А. Горбатова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: Норд Компьютер, 2006. – 669 с.
2. Механо-гидравлические шнековые системы

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

выгрузки и транспортирования / В.Г. Нечепаев. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – 215 с.
3. Очистные комбайны для тонких пластов / Н.Г. Бойко. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2010. – 476 с.
4. Угледобывающие комбайны. Конструирование и расчет / В.Г. Миничев. – М.: Машиностроение, 1976. – 248 с.
5. Повышение производительности выгрузки угля очистными комбайнами для тонких пластов со шнековыми исполнительными органами: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.05.06 / Тарасевич Вадим Игнатьевич. – Донецк, 1979. – 21 с.
6. Исследование и определение параметров шнеков с переменным шагом очистных комбайнов для тонких пластов с целью повышения их погрузочной способности: автореф. дис…. канд. техн. наук: 05.05.06 / Нечепаев Валерий Георгиевич. – Донецк, 1982. – 21 с.
7. Снижение неравномерности нагрузки и повышение производительности комбайнов со шнековым исполнительным органом для тонких пологих пластов: автореф. дис…. канд. техн. наук: 05.15.16 / Шевцов Владимир Георгиевич. – Донецк, 1997. – 23 с.
8. Теория рабочих процессов комбайнов для добычи угля из тонких пологих пластов: автореф. дис. …докт. техн. наук: 05.05.06 / Бойко Николай Георгиевич. – Москва, 1985. – 30 с.
9. Научные основы создания высокопроизводительных шнековых систем выгрузки угля очистных комбайнов: автореф. дис…. докт. техн. наук: 05.05.06 / Нечепаев Валерий Георгиевич. – Донецк, 2002. – 36 с.
10. Обоснование технических и технологических параметров выемки тонких пластов угля с применением быстроходной выемочной машины с малым захватом: автореф. дис…. канд. техн. наук: 05.05.06; 25.00.22 / Лиманский Александр Васильевич. – Москва, 2007. – 20 с.
11. Техника и технология малозахватной выемки твердых полезных ископаемых из маломощных пластов / Ю.В. Дмитрак [и др.] // Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня. – М.: Горная книга, 2011. – 16 с.
12. Ocena odciążenia jednoorganowego kombajnu ścinowego na podstawie badań analityczch / Lukasz Boloz. – Krakow, 2012. – 127 p.
13. Автоматизация процессов управления очистными комбайнами на основании моделирования работы шнека: автореф. дис…. канд. техн. наук: 05.13.07 / Бубликов Андрей Викторович. – Днепропетровск, 2010. – 15 с.
14. А.с. 1640682/22-3. Шнековый исполнительный орган горной машины / Г.Н. Самосов [и др.] (СССР). – №1640682/22-3; заявл. 26.03.71; опубл. 22.02.1973; бюл. №4. – 2 с.
15. А.с. 2497105/22-03. Шнековый исполнительный орган угольного комбайна / Г.Н. Самосов [и др.] (СССР). – №2497105/22-03; заявл. 13.06.77; опубл. 05.05.1980; бюл. №17. – 4 с.
16. А.с. 1624124 СССР, МКИ Е 21 С 25/04. Шнековый исполнительный орган горной машины / Н.Г. Бойко [и др.] (СССР). – №3864110/63; заявл. 04.03.85; опубл. 30.01.91; бюл. №4. – 4 с.
17. А.с. 1537803 СССР, МКИ Е 21 С 25/04. Шнековый исполнительный орган горной машины / Н.Г. Бойко [и др.] (СССР). – №3851324/22-63; заявл. 30.01.85; опубл. 23.01.90; бюл. №3. – 3 с.
18. А.с. 2138764/22-03 СССР, МКл Е 21 С 25/04. Шнековый исполнительный орган выемочной машины / М.Н. Мельников (СССР). – №2138764/22-03; заявл. 26.05.75; опубл. 05.04.80; бюл. №13. – 3 с.
19. А.с. 3750714/22-3 СССР, МКл Е 21 С 27/00. Очистной комбайн / Н.Г. Бойко [и др.] (СССР). – №3750714/22-3; заявл. 07.06.84; опубл. 07.12.85; бюл. №45. – 5 с.
20. А.с. 2016194, МПК Е 21 С 27/00. Очистной комбайн для тонких пластов угля / А.М. Журавлев [и др.]. – №2016194; заявл. 18.09.89; опубл. 07.15.94; бюл. №45. – 5 с.
21. А.с. 4021976/22-03 СССР, МКл Е 21 С 27/02. Очистной узкозахватный комбайн / Н.Г. Бойко [и др.] (СССР). – №4021976/22-03; заявл. 12.02.86; опубл. 30.06.87; бюл. №24. – 2 с.
22. А.с. 3943076/22-03 СССР, МКл Е 21 С 27/02. Очистной узкозахватный комбайн / Н.Г. Бойко [и др.] (СССР). – №3943076/22-03; заявл. 06.08.85; опубл. 30.10.87; бюл. №40. – 4 с.
23. МПК Е 21 С 35/12. Очистной комбайн со шнековым или барабанным исполнительным органом / Ройтер Мартин (DE). – №2011151089-03; заявл. 14.12.2011; опубл. 20.06.2013; бюл. №17. – 11 с.
24. Обоснование параметров шнекового исполнительного органа очистных комбайнов для тонких пластов / О.Е. Шабаев [и др.] // Системы управления электротехническими объектами: сб. научных трудов седьмой Всероссийской научно-практической конференции. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – Вып.8. – С. 83-88.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

P.P. Zinchenko
Donetsk National Technical University (Donetsk)

TRENDS TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF CUTTER-LOADERS FOR THIN HALFHORIZONTAL LAYERS

Background. *When creating cutter-loaders that can work effectively in thin horizontal layers, it is necessary to take into account the influence of the geometric parameters of their working units in the process of loading the discharged coal on the grating conveyor. The optimized loading capacity of working units achieved only with a comprehensive account of the influence of specific geometric parameters of the augers and their drives.*
Materials and/or methods. *In solving this problem, the works of domestic and foreign scientists, as well as the authors' certificates aimed at improving the productivity of cutter-loaders for thin flat layers considered and analyzed.*
Results. *The further direction of the increase of efficiency of work of cutter-loaders with screw working bodies intended for work in conditions of thin flat layers proved.*
Conclusion. *The minimum power for destruction and loading provided at a width of 0.4 to 0.6 m, which reduces the energy intensity of the process of crushing and loading by two times (from 0.72 to 0.35 kWh/t). Further studies are required to increase the capacity of the unloading window and reduce the circulation of the discharged rock mass, which should be carried out using specialized software for simulation of the working processes of cutter-loaders in thin flat layers.*

Keywords: *loading, specific energy consumption, optimization of parameters, auger, loading capacity.*

Сведения об авторе
П.П. Зинченко
SPIN-код: 4710-7409,
ORCID iD: 0000-0002-4070-2715
Телефон: +380 (66) 427-45-36
Эл. почта: pawel.zin4encko@yandex.ru

Статья поступила 03.06.2019 г.
© П.П. Зинченко, 2019
Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 622.625.6

Е.Л. Игнаткина
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ ШАХТНЫХ ПОДВЕСНЫХ МОНОРЕЛЬСОВЫХ ДОРОГ

Разработан стенд для экспериментальных исследований сил трения тормозных устройств шахтной подвесной монорельсовой дороги. Получены значения коэффициента трения тормозных колодок с вертикальной стенкой монорельса для сухих, влажных и загрязненных контактирующих поверхностей.

Ключевые слова: *монорельс, сила трения, тормозная колодка, коэффициент трения.*

Постановка проблемы

При эксплуатации монорельсового транспорта в режиме торможения возникают процессы, негативно влияющие на конструкционные элементы шахтной подвесной монорельсовой дороги (ШПМД), которые требуют детального изучения. Одним из основных элементов ШПМД, определяющим безопасность ее эксплуатации, является тормозная система. Такие параметры этой системы, как усилие прижатия тормозных колодок и их коэффициент трения с вертикальной стенкой монорельса, определяют тормозную способность ШПМД.

В настоящее время для рельсового железнодорожного и шахтного транспорта процесс реализации тормозного усилия исследован довольно подробно. Однако подвесной монорельсовый путь существенно отличается от традиционного, поскольку тормозные колодки прижимаются к вертикальной стенке монорельса и имеют специфическую форму. Поэтому выбор значений коэффициента трения является неоднозначным и довольно затруднительным, поскольку при этом необходимо учитывать как фрикционные свойства контактируемых материалов, так и состояние их поверхностей – обводненность, загрязненность, а также форму и размеры тормозных колодок.

Анализ последних исследований и публикаций

Исследованию тормозных устройств посвящено ряд работ. Статьи [1,2] направлены на повышение эффективности применения тормозных систем горных, строительных и подъемно-транспортных машин с использованием замкнутых кинематических контуров. В работах [3…5] приведены результаты исследований тормозных систем поездов шахтного транспорта, содержащих колодочно-колесные и рельсовые тормоза. Авторами обоснована область применения локомотивной откатки с учетом эффективности торможения различных систем, рассмотрены особенности торможения рельсовыми тормозами шахтного поезда с тяжелым шарнирно-сочлененным локомотивом. В монографии [6] обоснованы параметры тормозной системы шахтного локомотива, обеспечивающие повышение значений реализуемой локомотивом тормозной силы и зависимость тормозных характеристик от геометрических и динамических параметров тормозных механизмов.

Исследования [7,8] посвящены построению математической модели движения вагона, идентификации параметров модели и фильтрации координат движения вагона по монорельсовой дороге. Новые подходы, обеспечивающие стабильность коэффициента трения при разных режимах торможения, предложены в статьях [9,10]. Изложенные подходы заключаются в сочетании фрикционных материалов для высокоскоростного наземного транспорта.

В работах [11…15] рассмотрены проблемы эксплуатации шахтных подвесных монорельсовых дорог. При этом исследованы вопросы повышения эффективности работы и безопасности их эксплуатации за счет оптимизации переходных процессов, возникающих во время разгона или торможения подвижного состава. Определен оптимальный режим торможения ШПМД, а также установлены зависимости между параметрами подвижного состава и тормозными усилиями, что позволяет минимизировать время торможения и повысить безопасность работы монорельсового транспорта.

Анализ последних исследований и публикаций показывает, что установленные закономерности торможения подвижного состава и значения коэффициентов сцепления колес с рельсами не учитывают специфику подвесного монорельсового транспорта, эксплуатируемого в горных выработках.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Цель (задачи) исследования

Цель работы – установить влияние условий контакта тормозных колодок с монорельсом на их коэффициент трения и тормозную способность ШПМД. Для достижения указанной цели решены следующие задачи: спроектирован стенд для определения коэффициента трения тормозных колодок с монорельсом, разработаны программа и методика испытаний, произведен выбор измерительной аппаратуры и установлены фактические значения усилий прижатия тормозных колодок и силы трения, развиваемой тормозным устройством.

Основной материал исследования

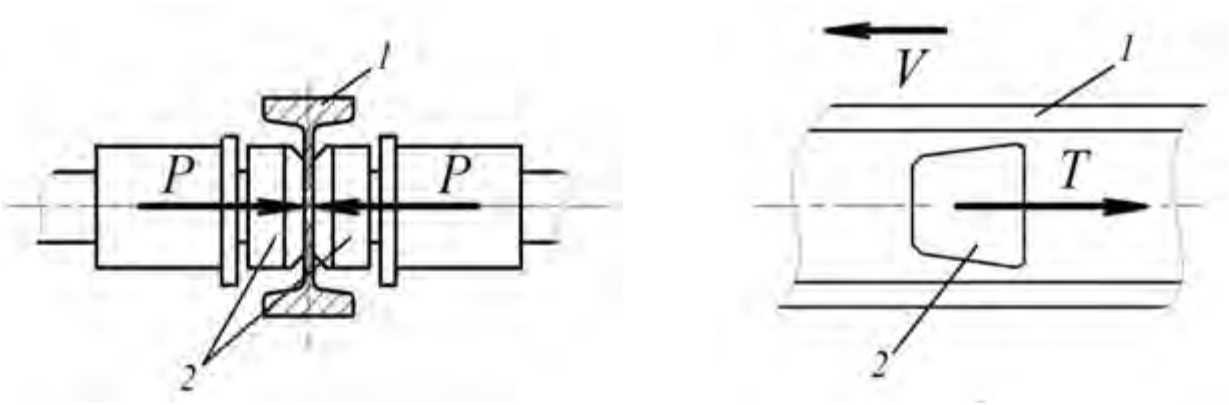
Торможение состава современных ШПМД осуществляется с помощью тормозных устройств клещевого типа, которыми оборудуются, как правило, тормозные и тяговые тележки. Схема расположения колодок тормозных устройств относительно монорельса показана на рис. 1.

Тормозные колодки прижимаются к стенке монорельса посредством рычажной системы, в результате чего возникает сила трения в системе колодка – монорельс, направленная в противоположную сторону движения состава. При этом эффективность торможения зависит от тормозной силы T, возникающей между монорельсом и парой колодок при приложении к ним прижимной силы P. Поэтому тормозное усилие определяется как $T=2\mu P$, где μ – коэффициент трения колодок с опорными поверхностями монорельса; P – усилие прижатия одной колодки к монорельсу. Как известно, коэффициент трения зависит от состояния поверхности монорельса, взаимодействующей с рабочей поверхностью тормозных колодок, и степени ее загрязнения. В подземных условиях, когда движение ШПМД происходит в запыленной и обводненной среде, поверхность монорельса может быть сухой, влажной, а также с присутствием на его поверхности угольной пыли и смазочных материалов, используемых для эксплуатации и обслуживания узлов подвижного состава.

Для определения коэффициента трения тормозных колодок с монорельсом спроектирован и изготовлен стенд, имитирующий тормозное устройство подвижного состава ШПМД. Общий вид стенда представлен на рис. 2.

Основой стенда является универсальная испытательная машина типа ГМС-50, имеющая разрывное усилие 100 кН и скорость движения 1,7 и 4,2 мм/с. К верхнему захвату машины закрепляется отрезок монорельса, выполненный из двутавровой балки, к нижнему – кронштейны с тормозными колодками, прижимаемыми с двух сторон двуплечими рычагами, связанными между собой связями. На одной стороне рычагов устанавливается тензометрический датчик, позволяющий измерять усилие прижатия тормозных колодок к монорельсу, а на другой – сжимающее пружинное устройство, создающее усилие прижатия. Для регистрации реализуемого тормозного усилия в подвесе монорельса монтируется еще один тензометрический датчик. Общий вид измерительной аппаратуры приведен на рис. 3.

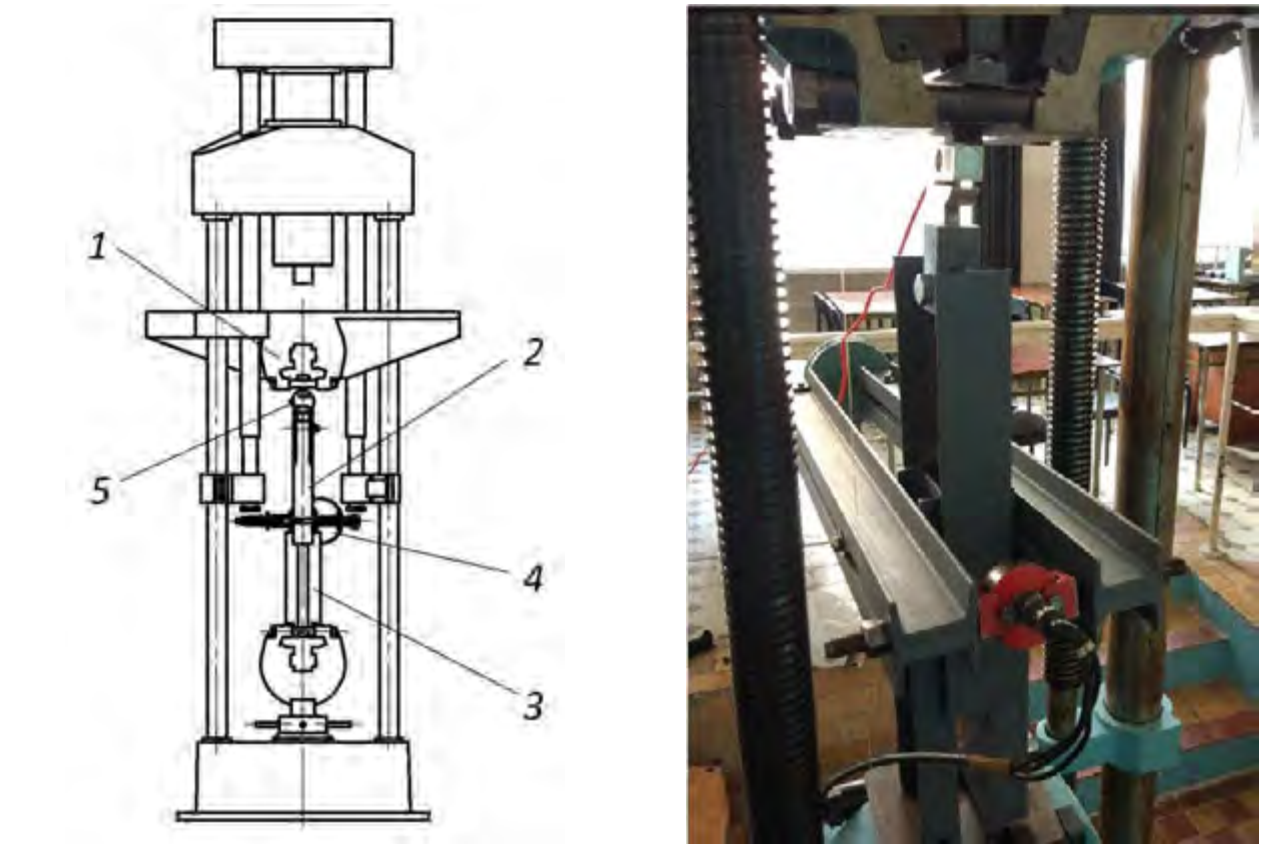
Для измерения усилия прижатия использовался тензометрический датчик, выполненный на базе тензорезисторов 2ФКПА10-10Б, а тягового усилия – тензометрический датчик Keli-PST-A5t. Эти датчики подключались к цифроаналоговому преобразователю АЦП-ЦАП 16/16 Sigma USB, использующему программное обеспечение ZET Lab и программу «Тензометр», устанавливаемые на персональный компьютер. При этом источником питания для измерительной системы являлись блоки «Агат» и БСП-5.



а б

Рис. 1. Схема расположения тормозных колодок относительно монорельса:
а – главный вид; *б* – вид сбоку; *1* – монорельс; *2* – тормозные колодки

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 2. Стенд для исследования тормозных устройств
и определения коэффициента трения тормозных колодок с монорельсом:
а – принципиальная схема; *б* – общий вид; *1* – испытательная машина ГМС-50; *2* – монорельс;
3 – кронштейн крепления тормозной колодки; *4*, *5* – тензодинамометры для регистрации усилия
прижатия тормозных колодок к монорельсу и реализуемого тормозного усилия

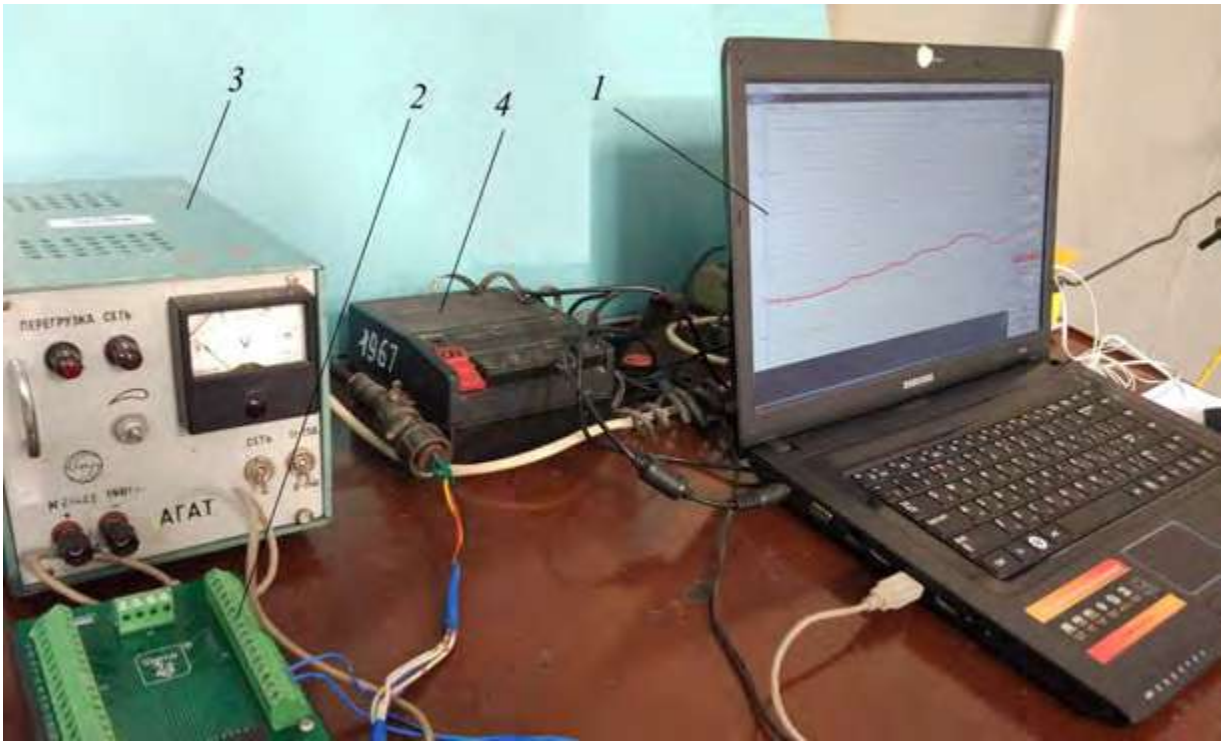


Рис. 3. Измерительное оборудование для обработки сигналов тензометрических датчиков:
1 – персональный компьютер; *2* – цифро-аналоговый преобразователь АЦП-ЦАП 16/16
Sigma USB; *3, 4* – блоки питания «Агат» и БСП-5

Тарирование датчиков производилось на специальном стенде с использованием стрелочного динамометрического прибора ДПУ-0,5. В итоге определены соотношения измерительных напряжений и нагрузок, которые составляли для датчика тормозной силы 1 мВ на 2452 Н и 1 мВ на 818 Н – для датчика усилия прижатия.

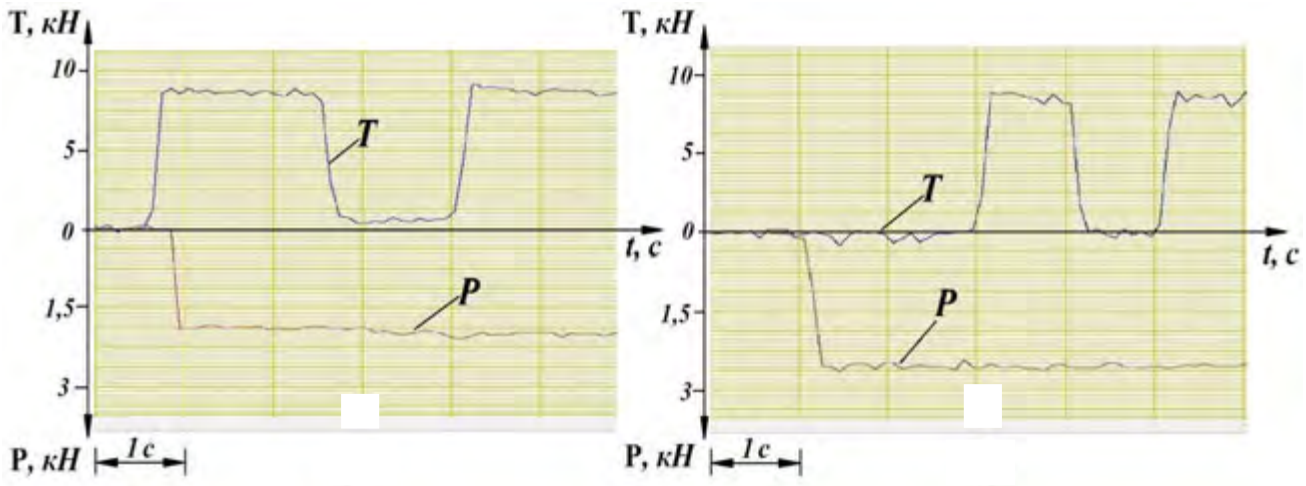
Предварительно перед проведением замеров тормозные колодки прижимались к монорельсу с усилием, установленным согласно программе и методике испытаний. После этого производился запуск испытательной машины ГМС-50 и перемещался верхний захват с прикрепленным к нему тензометрическим датчиком и монорельсом. Поскольку свободный конец монорельса был зажат прижимными рычагами, то при его перемещении возникали силы сопротивления движению, определяемые силами трения тормозных колодок с их контактируемыми поверхностями.

Возникающие усилия регистрировались при помощи тензометрических датчиков, цифроаналогового преобразователя и персонального компьютера.

Согласно программе испытаний в процессе проведения опытов менялись степень загрязнения и влажность стенки монорельса. Замеры производились с использованием различных видов породной и угольной пыли. При этом значение прижимного усилия тормозных колодок принималось близким к значению, используемому в реальных условиях при эксплуатации ШПМД, и диапазон усилия прижатия, приходящегося на одну тормозную колодку, составлял от 5 до 20 кН.

Пример осциллограммы движения тормозных колодок по монорельсу приведен на рис. 4.

Из осциллограмм видно, что максимальное тормозное усилие во время движения колодок по монорельсу составляет 8,70 кН при усилии прижатия 15,04 кН. После снятия замеров тормозного усилия во время движения для получения более достоверных значений производилась остановка испытательной машины, что на осциллограмме соответствует его нулевому значению. Коэффициент трения μ, реализуемый на сухой поверхности монорельса, составляет 0,58, а на влажной – 0,41.



а б

Рис. 4. Осциллограммы изменения усилий *P* и *T* во время движения тормозных колодок по монорельсу: *а* – поверхность монорельса сухая, без пыли; *б* – влажная, без пыли

На основании полученных данных рассчитаны дисперсии параллельных опытов, среднеквадратическое отклонение тормозного усилия и определены значения коэффициента трения колодок для различной степени загрязнений монорельса. Основные результаты измерений приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что наибольшее значение μ=0,56 достигает, когда поверхность монорельса сухая и не запылена. Для случая, когда поверхность монорельса влажная и покрыта пылью, μ=0,10, коэффициент трения принимает минимальное значение. Анализируя полученные результаты, можно сказать, что в зависимости от состояния поверхности и наличия на ней пыли значение коэффициента трения контактирующих поверхностей в процессе торможения отличается более чем в 5 раз.

Это обстоятельство необходимо учитывать для выполнения расчетов режимов движения ШПМД и выбора массы подвижного состава.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 1. Результаты экспериментального определения коэффициента трения тормозных колодок с монорельсом

Состояние поверхности стенки монорельса	Математическое ожидание T, кН	Дисперсия T, кН	Среднеквадратическое отклонение T, кН	Коэффициент трения колодки с монорельсом, μ
Сухая, без пыли	3,024	506,5	0,712	0,45…0,56
Влажная, без пыли	3,318	842,2	0,918	0,37…0,44
Сухая, покрыта породной пылью	3,227	824,7	0,908	0,35…0,45
Влажная, покрыта породной пылью	1,626	1599,5	1,265	0,17…0,27
Сухая, покрыта пылью (уголь марки «Г»)	1,051	841,0	0,917	0,11…0,19
Влажная, покрыта пылью (уголь марки «Г»)	1,295	987,3	0,934	0,12…0,22
Сухая, покрыта пылью (уголь марки «А»)	1,297	774,0	0,880	0,12…0,22
Влажная, покрыта пылью (уголь марки «А»)	1,266	840,0	0,917	0,10…0,19

Выводы

Разработан стенд для определения коэффициента трения колодок с монорельсом, который позволяет установить влияние условий их контакта на тормозную способность ШПМД.

Установлены фактические значения усилия прижатия тормозных колодок и силы трения, развиваемой тормозным устройством, которое составляет при чистой поверхности 3,02…3,32 кН, запыленной сухой – 1,05…3,23 кН, запыленной влажной – 1,26…1,63 кН.

Получены следующие значения коэффициента трения тормозных колодок с монорельсом для различных поверхностных загрязнений. При запыленном монорельсе наибольшее значение коэффициента трения равно 0,58; при запыленном сухом – 0,45; при запыленном влажном – 0,25. Следовательно, в зависимости от состояния контактирующих поверхностей и вида пыли, их покрывающей, тормозное усилие может изменяться более чем в 5 раз.

Список литературы

1. Энергосберегающие и энергонакопительные тормозные системы горных, строительных и подъемно-транспортных машин с использованием замкнутых кинематических контуров / В.С. Исаков [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. – №10. – С. 29-35.
2. Исаков, В.С. Повышение эффективности применения энергосберегающих технологий в процессах торможения подъемно-транспортных, строительных и горных машин / В.С. Исаков, А.В. Ерейский // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2018. – №3. – С. 80-88.
3. Коптовец, А.Н. Исследование тормозной эффективности шахтных поездов / А.Н. Коптовец, А.В. Новицкий, С.Ф. Шибалов // Горная электромеханика и автоматика. – 2004. – Вып.203. – С. 56-61.
4. Разработка тормозных систем подвижного состава шахтного рельсового транспорта высокого технического уровня / А.Н. Коптовец [и др.] // Молодой ученый. – 2015. – №5(20). Ч.1. – С.43-46.
5. Процив, В.В. Моделирование торможения шахтного поезда рельсовыми тормозами: монография. – Д.: Национальный горный университет, 2011. – 180 с.
6. Таран, И.А. Тормозные устройства шахтных локомотивов: монография. – Д.: Нац. горн. ун-т, 2014. – 203 с.
7. Гречишкина, Н.А. Идентификация параметров модели и фильтрация координат движения вагона монорельсовой дороги / Н.А. Гречишкина, Ф.Н. Григорьев, Н.А. Кузнецов // Информационные процессы. – 2015. – №3.Т.15. – С. 343-350.
8. Гречишкина, Н.А. Адаптивное управление движением вагона монорельсовой дороги / Н.А. Гречишкина, Ф.Н. Григорьев, Н.А. Кузнецов// Информационные процессы. – 2015. – №15(4). – С. 440-446.
9. Providing stable friction properties of disc brakes for railway vehicles / Y. Osenin [et al.] // Transport problems. – 2017. – Iss.1. Vol.12. – P. 63-71.
10. Ehlers, H.R. Potential and limits of opportunities of the block brake / H.R. Ehlers [et al.] // Glasers Annalen. – 2002. – No.6/7. – P. 290-300.
11. Гутаревич, В.О. Исследование продольных колебаний подвесного монорельсового пути / В.О. Гутаревич // Вестник ВНУ им. В. Даля. – 2013. – №5(194). Ч.1. – С. 100-105.
12. Гутаревич, В.О. Обоснование оптимального режима пуска и торможения шахтной подвесной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич, Е.Л. Игнаткина // Горный информаци-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

онно-аналитический бюллетень. – 2016. – №9. – С. 29-36.
13. Gutarevych, V. Dynamic model of movement of mine suspended monorail / V. Gutarevych // Transport Problems. – 2014. – Iss.1. Vol.9. – P. 13-18.
14. Gutarevych, V. Research of Regularities of Suspended Mine Monorail Motion / V. Gutarevych // Mechanical Testing and Diagnosis. – 2014. – Vol.1(IV). – P. 2-17.
15. Игнаткина, Е.Л. Проблемы и направления совершенствования тормозных устройств шахтных подвесных монорельсовых дорог / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции в г. Севастополе 11-17 сентября 2017 г. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 118-121.

E.L. Ignatkina
Donetsk National Technical University (Donetsk)

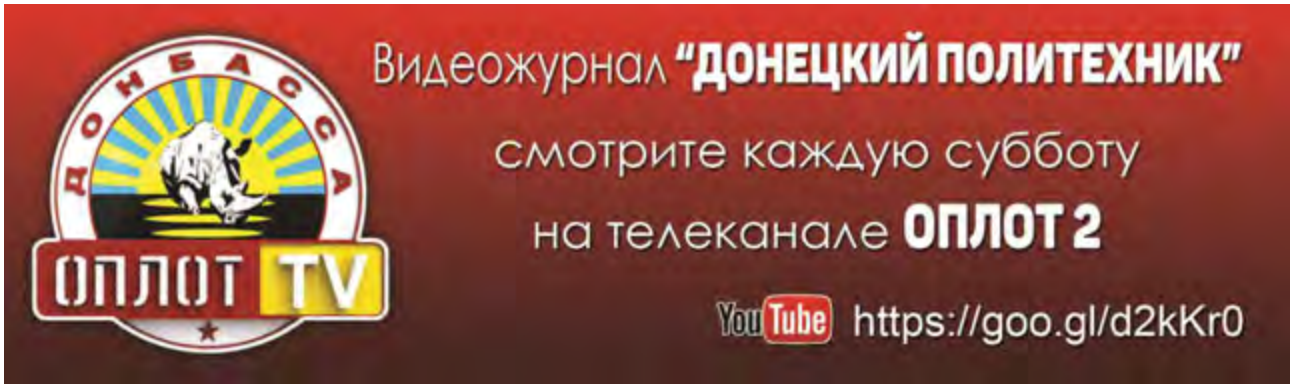
EXPERIMENTAL STUDY OF BRAKING DEVICES OF MINE SUSPENDED MONORAIL TRACKS

Background. *The paper presents the description of the developed test bench for experimental study of the friction forces of the brake devices of mine suspended monorail. The objective of the paper is to establish the regularities of the influence of the contact conditions of brake pads with the monorail on the braking capacity of the braking devices of mine suspended monorail tracks.*
Materials and/or methods. *The stand designed for determination of the coefficient of friction of the brake pads with a monorail, the program and methods of testing developed, measuring equipment selected, the actual value of the pressing forces of brake pads and friction forces of the brake device determined.*
Results. *The values of the friction coefficient of brake pads with a vertical wall of the monorail for dry, wet and contaminated contact surfaces obtained, the range of which is from 0.10 to 0.58. The minimum and maximum values of the friction force of 1.26 kN and 8.7 kN, respectively, with a pressing force of 15.04 kN determined.*
Conclusion. *The coefficient of friction of the contacting surfaces during braking takes the following maximum values: not dusty dry – 0.58; not dusty wet – 0.44; dusty dry – 0.4; dusty wet – 0.2. Thus, depending on the state of the surfaces and the type of dust covering them, the braking force can vary by more than five times.*

Keywords: *monorail, friction force, brake pad, coefficient of friction.*

Сведения об авторе
Е.Л. Игнаткина
SPIN-код: 4107-5333
Телефон: +380 (62) 301-08-54
Эл. почта: sel_post@mail.ru

Статья поступила 28.05.2019 г.
© Е.Л. Игнаткина, 2019
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 622.625.6

М.П. Кондратенко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ЗАКРУГЛЕНИЯМ МОНОРЕЛЬСОВОГО ПУТИ

Исследована взаимосвязь между конструктивными элементами тягового устройства фрикционного типа и шахтного подвесного монорельсового пути с закруглениями. Установлены закономерности влияния геометрических параметров на эксплуатационные качества тягового устройства при движении по горизонтальным закруглениям с учетом возникающих несовпадений усилий прижатия приводных колес.

Ключевые слова: *тяговое устройство, приводное колесо, монорельс, радиус закругления, усилие прижатия.*

Постановка проблемы

В шахтных подвесных монорельсовых дорогах (ПМД) широко применяются тяговые устройства фрикционного типа, которые позволяют реализовать силу тяги и торможения за счет фрикционной связи приводных колес с монорельсом. Такое тяговое устройство предполагает передачу силы тяги за счет значительного прижатия симметрично установленных по обе стороны к монорельсу приводных колес с вертикальной осью вращения. При движении по монорельсу с закруглениями возникают дополнительные нагрузки, воздействующие на тяговое устройство и приводящие к смещению приводных колес, что отрицательно сказывается на реализации тягового усилия и надежности работы транспортных монорельсовых систем. Одним из вариантов снижения дополнительных нагрузок является оптимизация геометрических параметров тягового устройства, в процессе которой требуется проведение предварительной оценки влияния геометрических параметров элементов конструкции на возникающие смещения приводных колес.

Анализ последних исследований и публикаций

Вопросу повышения эффективности работы ПМД посвящен ряд исследований. В работах [1…3] предложены ресурсосберегающие технологические схемы использования адаптивных возможностей ПМД для повышения темпов подготовки и отработки выемочных столбов в сложных горно-геологических условиях. Авторами рассмотрены процессы взаимодействия подвесной монорельсовой дороги с крепью и массивом горных пород. Задачами исследований [4…11] стало рассмотрение динамических процессов и нагрузок, которые возникают во время движения, пуска и торможения подвижного состава по монорельсовому пути. Эти исследования направлены на разработку математической модели движения по подвесному монорельсовому пути и оптимизации конструкций направляющих путей.

В работах [12…14] рассмотрены проблемы эксплуатации состава по искривленным горным выработкам, исследованы процессы изменения нагрузок на изгибах участка монорельса. В работе [15] авторами установлены закономерности изменения параметров тягового устройства во время движения по горизонтальным закруглениям пути, что позволяет определить фактические усилия прижатия приводных колес к монорельсу.

Вместе с тем, в указанных исследованиях не рассмотрен в полной мере вопрос влияния отдельных конструктивных элементов и их взаимосвязи на эксплуатационные качества тягового устройства фрикционного типа при движении по горизонтальным закруглениям, что подтверждает актуальность задач исследования.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является определение закономерностей влияния геометрических параметров конструктивных элементов на эксплуатационные качества тягового устройства фрикционного типа во время движения по горизонтальным закруглениям. Для достижения поставленной цели необходимо определить предельные значения геометрических параметров элементов тягового устройства и провести анализ их влияния на возможность движения по горизонтальным закруглениям различного радиуса путем оценки возникающих смещений привод-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ных колес, приводящих к несовпадению усилий их прижатия.

Основной материал исследования

Для оценки смещений приводных колес тягового устройства, возникающих во время движения по закругленным участкам, представляет практический интерес коэффициент изменения межосевого расстояния k, равный отношению расстояния между осями вращения приводных колес (O_1O_2) при движении по закругленному участку к расстоянию между осями при движении по прямолинейному участку пути, позволяющий оценить несовпадения усилий прижатий приводных колес P (рис. 1).

На основании [15] коэффициент k рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{1}{D_k + t}\Big((2a + R_0(\sin\delta_2 - \sin\delta_1))^2 + \\ + R_0^2(\cos\delta_1 - \cos\delta_2)^2 + 2R_0\sin\delta_1\Big)^{\frac{1}{2}}, \qquad (1)$$

где D_k – диаметр приводных колес; a – длина плеча; R_0 – радиус, равный расстоянию от плеча до оси вращения приводного колеса; t – толщина вертикальной стенки монорельса; δ_1 и δ_2 – угол наклона R_0 относительно правого и левого плеча соответственно.

Рассчитать δ_1 и δ_2 можно по формулам:

$$\delta_1 = \arccos\frac{R_{P1}^2 + R_0^2 - (R_r - \frac{1}{2}(t + D_k))^2}{2R_{P1}R_0} - \\ - \arccos\frac{S_б - 2S_0}{2R_{p1}};$$

$$\delta_2 = \arccos\frac{R_{P2}^2 + R_0^2 - (R_r + \frac{1}{2}(t + D_k))^2}{2R_{P2}R_0} - \\ - \arccos\frac{S_б - 2S_0}{2R_{p2}}, \qquad (2)$$

где S_0 – расстояния между плечами и осью вращения ходовых колес; $S_б$ – жесткая база тягового устройства; R_r – радиус закругления; R_{p1} и R_{p2} – радиусы, описываемые при движении правым и левым плечами соответственно, значение которых можно определить по формулам:

$$R_{p1} = \sqrt{R_r^2 + a^2 + S_0^2 - S_б S_0 - a\sqrt{4R_r^2 - S_б^2}},$$

$$R_{p2} = \sqrt{R_r^2 + a^2 + S_0^2 - S_б S_0 + a\sqrt{4R_r^2 - S_б^2}}. \qquad (3)$$

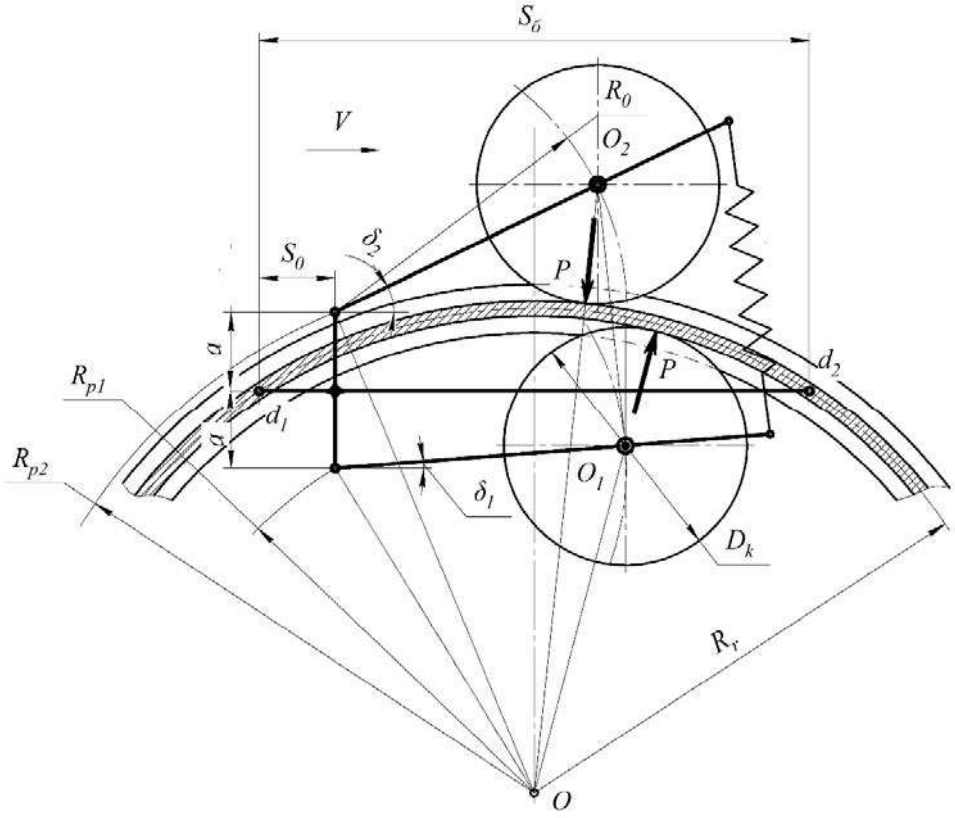


Рис. 1. Геометрическая модель движения тягового устройства по горизонтальным закруглениям монорельсового пути ПМД

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Основным параметром, влияющим на смещение тяговых колес, является радиус закругления, при увеличении которого возникающие смещения приводных колес уменьшаются, т.е. коэффициент k снижается и стремится к единице. При уменьшении радиуса – смещения приводных колес увеличиваются, т.е. коэффициент k возрастает и может превысить 1,6, что способствует возникновению дополнительных нагрузок на элементы тягового устройства и монорельсов, которые приводят к изгибу монорельсового пути, преждевременному износу футеровки тяговых колес, снижению передачи тягового усилия и коэффициента сцепления. Значение коэффициента k также во многом зависит от геометрических параметров и конструкции тягового устройства, и его снижение возможно путем оптимизации параметров таких элементов, как жесткая база $S_б$, расстояние S_0, диаметр приводных колес D_k, длина плеча a, радиус R_0 (см. рис. 1).

Для проведения анализа влияния параметров конструктивных элементов на величину смещений приводных колес с использованием математической модели, описывающей геометрию процесса прохождения горизонтальных закруглений (1), рассматривается тяговое устройство, движущееся по монорельсовому пути ПМД, радиус закругления которого, как правило, варьируется в пределах 500…4500 мм, а толщина вертикальной стенки монорельса t=7 мм. Характер возникающих изменений действующих нагрузок в системе монорельс – тяговое устройство наглядно отражается при значениях радиусов закругления, равных 500 мм, 700 мм, 1500 мм и 4500 мм. Максимально допустимое значение коэффициента изменения межосевого расстояния k, определяющее его эксплуатационные качества и возможность движения по закруглениям без заклинивания, принято k=1,3, при превышении которого целесообразно изменять параметры конструктивных элементов тягового устройства. Минимальное значение, при котором возникающие смещения и соответствующие изменения усилий прижатия приводных колес не оказывают отрицательного влияния на реализацию тягового усилия и надежность работы монорельсовых систем, принято k=1,05.

Результаты проведенных расчетов для оценки смещений приводных колес при различных вариантах заданных параметров элементов тягового устройства представлены в табл. 1. Графические результаты расчетов представлены на рис. 2…4.

Рассмотрим закономерности влияния параметров жесткой базы $S_б$ и расстояния между плечами и осью вращения ходовых колес S_0 на эксплуатационные качества тягового устройства, у которого a=150 мм, D_k=450 мм, R_0=550 мм. При различных значениях $S_б$, (табл. 1), расстояние S_0=150 мм, а при различных значениях S_0 жесткая база $S_б$=1000 мм.

Используя выражение (3) и учитывая конструктивные особенности оборудования, определено, что при выборе размера жесткой базы должны учитываться следующие условия:

$$S_б \geq 2R_r^2,$$

$$S_б \geq (S_0 + \sqrt{R_0^2 - (\frac{D_k}{2} - a)^2}),$$

а при выборе значения S_0, следует учитывать, что его допустимые значения находятся в пределах $0 \leq S_0 \leq (S_б - D_k)$.

Из графиков, приведенных на рис. 2, видно, что коэффициент k возможно снизить путем увеличения размера жесткой базы, а также путем снижения расстояния между плечами и осью вращения ходовых колес.

Для ПМД с радиусом закругления монорельсового пути от 500 до 700 мм характерен резкий рост возникающих нагрузок, приводящих к смещению колес и несовпадению усилий прижатия.

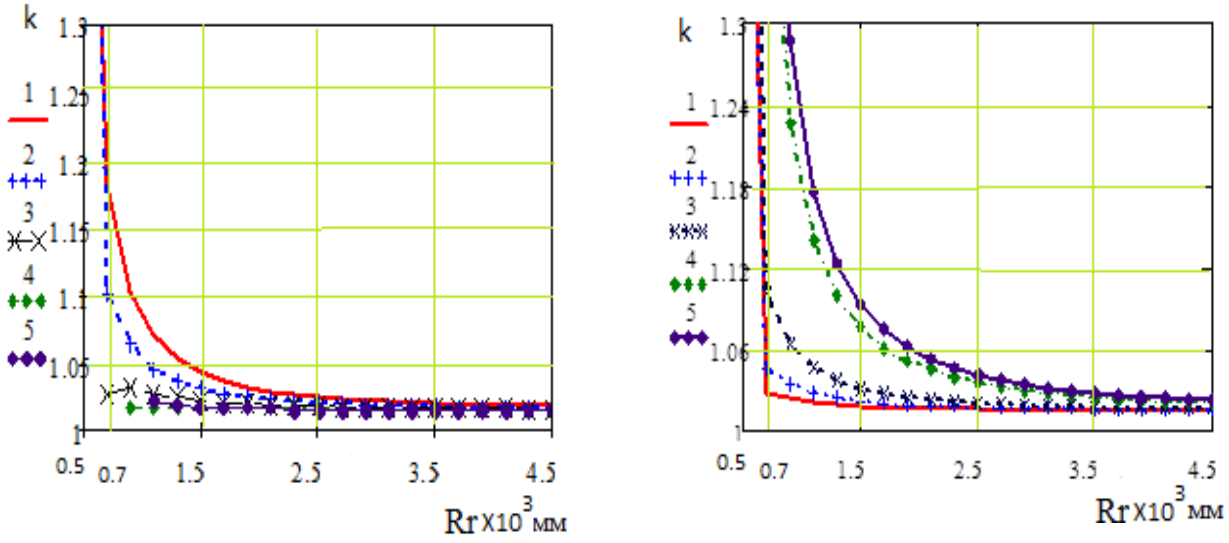
Кроме того, при множестве приведенных параметров рассматриваемых конструктивных элементов коэффициент k значительно превышает установленное допустимое значение 1,3.

Так, при рассмотрении влияния размеров жесткой базы $S_б$ (рис. 2а), установлена возможность применения только вариантов 1 и 2, для которых минимально возможный радиус закругления составляет 500 мм, а для варианта 3 – 650 мм.

Табл. 1. Расчетные показатели смещений приводных колес тяговых устройств при движении по горизонтальным закруглениям

Параметры элементов, мм	Возможные варианты сочетаний параметров					Расчетные значения k при различных R_r, мм							
						500		700		1500		4500	
	1	2	3	4	5	min	max	min	max	min	max	min	max
Жесткая база $S_б$	700	1000	1300	1600	2000	1,70	2,00	1,03	1,18	1,02	1,04	1,01	1,02
Расстояние S_0	0	50	150	450	550	1,70	2,02	1,02	1,63	1,02	1,09	1,01	1,02
Длина плеча a	0	50	250	400	550	1,60	3,43	1,03	1,29	1,02	1,05	1,01	1,02
Длина R_0	250	350	450	550	650	1,80	2.02	1,02	1,18	1,02	1,04	1,01	1,02
Диаметр D_k,	250	350	450	550	650	1,90	2,53	1,05	1,13	1,03	1,04	1,01	1,03

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 2. График зависимости коэффициента k от радиуса R_r:
а – при различных $S_б$; *б* – при различных S_0

Увеличивая размеры жесткой базы в установленных пределах при движении по закруглениям с R_r=500 мм, можно снизить коэффициент k с 2,0 до 1,7, т.е. на 15 %. Однако, несмотря на значительное снижение нагрузок, требуется дополнительная оптимизация прочих параметров конструкции, так как k>1,3.

Рассматривая влияние расстояния S_0 (см. рис. 2б), при движении по закруглениям малого радиуса, установлено, что допустимыми являются только варианты 1 и 2. При R_r=500 мм коэффициент k может достичь 2,02, и, оптимизируя S_0 до 0...50 мм, можно снизить k на 12 %. При малых радиусах закругления, как и в случае с $S_б$, дополнительно требуется изменение прочих конструктивных параметров.

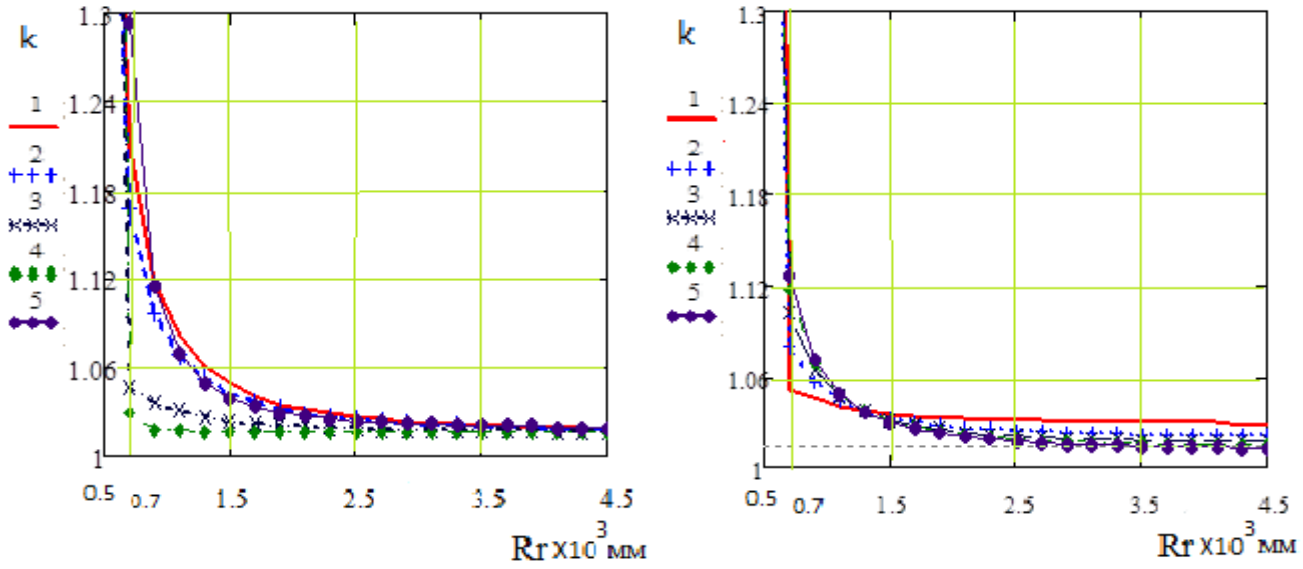
Для монорельсового пути с радиусом закругления 700…1500 мм коэффициент k практически во всех случаях не превышает 1,3, однако параметры $S_б$ и S_0 существенно влияют на возникающие смещения и соответствующие нагрузки. С учетом того, что для жесткой базы, соответствующей варианту 4, минимальный радиус закругления равен 800 мм, а для жесткой базы, соответствующей варианту 5, – 1000 мм, наиболее приемлемым для рассматривания диапазона радиусов закругления является вариант 3. Для радиуса закругления R_r=700 k может достичь 1,18, и путем увеличения жесткой базы возможно его снижение не менее чем на 12 %. Аналогично, для расстояния S_0, соответствующего варианту 5, при R_r=700 мм k может превысить 1,6, и, оптимизируя S_0 до 0...150 мм, что соответствует вариантам 1, 2, 3, можно снизить k более чем на 30 %, в частности до 1,02.

Для радиусов закругления от 1500 мм и более размеры жесткой базы влияют несущественно, k при различных параметрах принимает значение ниже 1,05, и, увеличивая размеры жесткой базы, можно его снизить не более чем на 4 %. Однако без оптимизации параметров S_0, даже при радиусах 1500...2000 мм, k может превысить 1,05. Например, при варианте 5 при движении по R_r=1500 мм коэффициент k может достичь 1,09 и снизится более чем на 6 % при вариантах 1 и 2.

Прослеживается закономерность снижения коэффициента снижения межосевого расстояния при увеличении размеров жесткой базы, а также при уменьшении расстояния между плечами и осью вращения ходовых колес. Установлено, что для рассматриваемых параметров отсутствует конструктивная взаимосвязь, т.е. оптимизация каждого из них приводит к дополнительным улучшениям эксплуатационных качеств.

Рассмотрим закономерность влияния параметров длины плеча a, расстояния от плеча до оси вращения приводного колеса R_0 и диаметра приводных колес D_k на примере тягового устройства, у которого $S_б$=1000 мм, S_0=150 мм. В случае, когда параметр a принимает значения, представленные в табл. 1, при D_k=450 мм, R_0=550 мм, закономерность изменения эксплуатационных качеств представлена на рис. 3а. В случае, когда параметр D_k принимает значения, представленные в табл. 1, при a=150 мм, R_0=550 мм, закономерность изменения эксплуатационных качеств представлена на рис. 3б. В случае, когда параметр R_0 принимает значения, представленные в табл. 1, при a=150 мм, D_k=450 мм, закономерность изменения эксплуатационных качеств представлена на рис. 4.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 3. График зависимости коэффициента k от радиуса R_r:
a – при различных параметрах a; $б$ – при различных D_k

Учитывая конструктивные особенности оборудования, при выборе расстояния от плеча до оси вращения приводного колеса R_0 целесообразно соблюдать условия:

$$R_0 > \frac{D_k}{2},$$

$$R_0 \le \sqrt{(\frac{D_k}{2} - a)^2 + (S_б - S_0)^2}.$$

Для монорельсового пути с радиусом закругления от 500 до 700 мм характерен резкий рост возникающих нагрузок, приводящих к смещению колес. Также для множества приведенных параметров рассматриваемых элементов конструкции коэффициент k значительно превышает установленное допустимое значение 1,3. При анализе влияния параметров R_0 (рис. 4) установлена закономерность снижения k при уменьшении R_0. А из графиков, приведенных на рис. 3а, 3б, видно, что с увеличением диаметра D_k или плеча a до определенных значений наблюдается уменьшение смещений приводных колес. Однако из рис. 3а прослеживается изменение влияния длины плеча a для монорельсового пути с радиусом закругления менее 700 мм. Расчетным путем установлено, что указанные изменения характерны для тягового устройства с жесткой базой $S_б \approx 2R_r$. Кроме того, из рис. 3б прослеживается изменение влияния диаметра колес D_k при радиусах закругления менее 1000 мм. Расчетным путем установлено, что для указанного диапазона радиусов закругления характер влияния диаметра колес неоднозначен и проявление этих изменений зависит в большей степени от параметров жесткой базы $S_б$, расстояний R_0 или S_0, что следует из анализа выражений (2), (3).

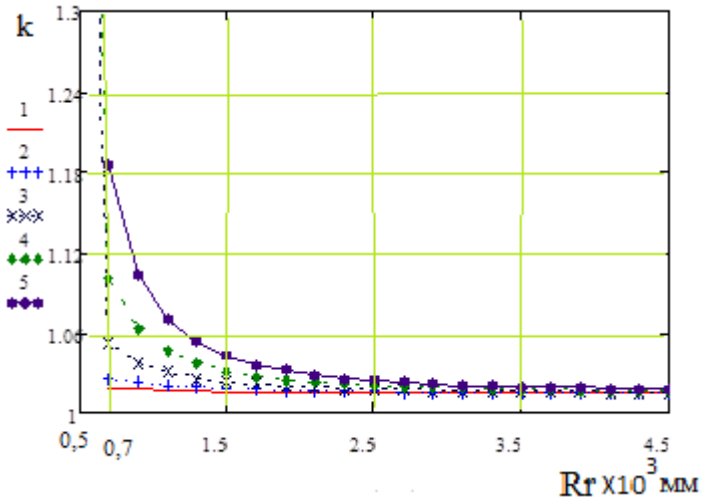


Рис. 4. Зависимость коэффициента k от радиуса R_r при различных D_k

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Так, при $S_б$=1000 мм уменьшение размеров плеча a приводит к значительному снижению k. При R_r=00 мм недопустимы размеры плеча более 250 мм, как видно на примерах 1, 2 и 4, и, оптимизируя a с 400 мм до 0...50 мм, можно снизить k на 40 % и более – с 2,88 до 1,6. Дополнительно снижая S_0, можно достичь k менее 1,3.

При R_r=500 мм увеличение диаметра приводных колес также существенно снижает коэфициент k. С увеличением диаметра от 250 мм до 650 мм (варианты 1…5) k принимает значение от 2,53 до 1,9 соответственно, т. е. путем оптимизации D_k возможно снижение смещения приводных колес на 25 %. Таким образом, целесообразным является применение варианта 2. Расчетным путем установлено, что, повышая D_k до 650 мм и дополнительно снижая длину плеча a, расстояние S_0 и длину R_0, можно достичь k<0,5 даже при радиусах закругления 500 мм.

При анализе влияния R_0 расчетные данные показывают, что при малых радиусах приемлемыми являются только варианты 3 и 4, при которых k достигает и 1,8 и 1,2 соответственно, т. е., уменьшая R_0 с 550 мм до 450 мм, можно снизить нагрузки на 10 %. Варианты 1, 2 и 5 неприменимы для R_r=500, однако установлено, что, дополнительно снижая длину плеча a и расстояние S_0, можно достичь k равным 1,3 и ниже даже при этих вариантах.

Для ПМД с радиусом закругления монорельсового пути от 700 до 1500 мм коэффициент k для всех рассматриваемых вариантов не превышает 1,3. Однако меняется характер влияния плеча a, что объясняется превышением значения $2R_r$ над размером жесткой базы (см. рис. 3а). Так, с ростом плеча a в пределах D_k, для радиусов закругления более 700 мм. наблюдается снижение k. При вариантах 3 и 4 k достигает минимальных значений в пределах 1,04...1,02. При R_r=700 мм оптимальная длина плеча a лежит в пределах от 50 до D_k , при которых k возможно снизить на примере вариантов 1 и 4 на 15 %, т. е. с 1,21 до 1,03, из чего следует, что длина плеча a не должна превышать D_k, как в варианте 5.

Кроме того, изменяется характер влияния диаметра D_k (см. рис. 3б). При R_r=700 мм, с уменьшением D_k с 650 мм до 250 мм (см. табл. 1) наблюдается снижение k с 1,13 до 1,05 – на 7 %, и целесообразным является применение варианта 1. А при радиусах закругления более 1000 мм, напротив, характерно снижение k при увеличении диаметра приводных колес.

Анализ влияния R_0 показывает, что, уменьшая данный параметр с 650 до 250 мм, для монорельса с закруглением R_r=700 мм можно снизить k с 1,18 до 1,02, т. е. на 13 %.

Для монорельсового пути с радиусом закругления от 1500 мм и более значения рассматриваемых параметров влияют несущественно, k при различных вариантах принимает значение ниже 1,05, и путем их оптимизации возможно снижение загрузок на 1…4 %.

При оптимизации длины плеча возможно снижение нагрузок на 1…2 %, однако наиболее приемлемыми являются варианты 3, 4, т. е. длина плеча должна находиться в пределах 250…400 мм. При увеличении диаметра приводных колес коэффициент k снижается на 1 % и наиболее приемлемыми являются варианты 3…5. При уменьшении расстояния от плеча до оси вращения приводного колеса коэффициент k снижается не более чем на 1 %.

Выводы

Проведенные исследования и расчеты позволили определить закономерности влияния геометрических параметров конструктивных элементов на эксплуатационные качества тягового устройства фрикционного типа. Использование математической модели, описывающей геометрию процесса прохождения горизонтальных закруглений, дает возможность определить возникающие смещения приводных колес и несовпадение усилий их прижатия, а также снизить возникающие нагрузки путем оптимизации параметров конструктивных элементов тяговых устройств ПМД.

Установленные предельные значения геометрических параметров жесткой базы $S_б$, расстояния между плечами и осью вращения ходовых колес S_0, расстояния от плеча до оси вращения приводного колеса R_0, длины плеча a и диаметра приводных колес D_k во многом зависят от присущих монорельсовому пути радиусов закругления, от конструктивных особенностей приводных блоков и условий эксплуатации.

При анализе влияния геометрических параметров элементов тягового устройства на возможность движения по горизонтальным закруглениям в диапазоне от 500 до 4500 мм установлена закономерность снижения коэффициента межосевого расстояния k при увеличении размеров жесткой базы, уменьшении расстояния между плечами и осью вращения ходовых колес, уменьшении расстояния от плеча до оси вращения приводного колеса. Установлено, что при выборе параметров длины плеча и диаметра приводных колес необходимо учитывать их взаимосвязь между собой и иными параметрами устройства, а также неоднозначность влияния на возникающие смещения приводных колес в зависимости от размера жесткой базы и радиуса

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

закругления при радиусах закругления до 1000 мм.

Особенно важно оптимизировать геометрические параметры тяговых устройств при их эксплуатации по монорельсовому пути с радиусом закругления менее 1500 мм, где коэффициент *k* может значительно превысить допустимое значение 1,3, и значение каждого параметра существенно влияет на возникающие загрузки. Однако использование предлагаемой математической модели и результатов проведенных в работе исследований позволяет определить значения конструктивных элементов, при которых даже при радиусах закругления равных 500 мм коэффициент межосевого расстояния не превысит 0,05. Для радиусов закругления более 1500 мм влияние параметров заметно снижается, и их оптимизация дает возможность снизить коэффициент *k* на 1…5 %.

Установленные при оценке геометрических параметров тягового устройства закономерности их влияния на возникающие смещения приводных колес при движении по горизонтальным закруглениям позволяют улучшить эксплуатационные характеристики тягового устройства и качество передачи тягового усилия, обеспечивая повышение коэффициента сцепления и предотвращение преждевременного износа футеровки тяговых колес и изгиба монорельса.

Список литературы

1. Ширин, Л.Н. Повышение эффективности работы монорельсовых дорог при подготовке запасов угля к очистной выемке: монография / Л.Н. Ширин, В.А. Расцветаев, А.И. Коваль. – Днепропетровск: НГУ, 2014. – 144 с.
2. Ширин, Л.Н. Оценка эксплуатационных параметров подвесных монорельсовых дорог / Л.Н. Ширин, Л.Н. Посунько, В.А. Расцветаев // Геотехническая механика. – 2008. – Вып.76. – С. 91-96.
3. Piecroza, E. Development of mine underground transportation with use of suspended monorail / E. Piecroza, J. Tokarchic // Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering – 2016. – No.4(532). – P. 96-106.
4. Bao, Y. A case study of dynamic response analysis and safety assessment for a suspended monorail system / Y. Bao, Y. Li, J. Ding // Int. J. Env. Res. Pub. He. – 2016. – No.13. – P. 1121.
5. Гутаревич, В.О. Динамика шахтных подвесных монорельсовых дорог: монография. – Донецк: ЛАНДОН-XXI, 2014. – 205 с.
6. Гутаревич, В.О. Динамическая загруженность монорельсовых тележек и подвесного пути // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2015. – №4. – С. 85-88.
7. Chengbiao, C. Dynamic interaction of suspension-type monorail vehicle and bridge: Numerical simulation and experiment / C. Chengbiao [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Vol.118. – P. 388-407.
8. Gutarevych, V.O. Mathematical modeling of end carriage motion on the overhead monorail // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – No.5. – P. 52-56.
9. Gutarevych, V.O. Mathematical Model Study of Suspended Monorail // Transport Problems. – 2012. – Iss.3. Vol.7. – P. 61-66.
10. Gutarevych, V. Research of Regularities of Suspended Mine Monorail Motion // Mechanical Testing and Diagnosis. – 2014. – Vol.1(IV). – P. 12-17.
11. Gutarevych, V.O. Research on the Influence of Dynamic Load on Suspended Monorail / V.O. Gutarevych [et al.] // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol.806. – P.23-29.
12. Веткин, А.С. Вписывание локомотивов в вертикальные закругления монорельсовых путей // Горные, строительные и дорожные машины. – Киев: Техника, 1983. – Вып.35. – С. 73-76.
13. Kawatani, M. Computer simulation for dynamic wheel loads of heavy trains / M. Kawatani, C.W. Kim // Structural Engineering and Mechanics. – 2001. – No.12. – P. 409-428.
14. Гутаревич, В.О. Исследование геометрических параметров монорельсовых тяговых устройств при движении в закруглениях пути // Вестник ВНУ им. В. Даля. – 2010. – №1(152), ч. 2. – С. 70-82.
15. Гутаревич, В.О. Влияние закруглений монорельсового пути на параметры тягового устройства / В.О. Гутаревич, М.П. Кондратенко // Сборник VIII Международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве», г. Междуреченск, 03-04 апреля 2019 г. – Междуреченск: КузГТУ, 2019. – С. 1221-1226.

M. P. Kondratenko
Donetsk National Technical University (Donetsk)

EVALUATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE TRACTION DEVICE MOVING ALONG THE CURVES OF A MONORAIL TRACK

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Background. *The paper investigates the relationship of structural elements of the traction system of friction type and mine suspended monorail with curvature. The objective of the paper is to determine the regularities of the influence of geometric parameters of structural elements on the performance of the friction type traction device while moving along horizontal curves.*
Materials and/or methods. *The author has assessed the displacement of the drive wheels of the traction device using a mathematical model describing the geometry of the process of passing horizontal curves. The limit values of the geometric parameters of the elements of the traction device determined by the calculation and analytical method. The analysis made of the influence of the geometric parameters on the implementation of the traction force in moving along horizontal curves radii 500 to 4500 mm by determining the coefficient of change of the centre distance.*
Results. *The obtained regularities allow defining the emerging displacement of drive wheels and divergent efforts of their pressing, and also reducing the load when moving along horizontal curves by optimizing the design of structural components of traction devices.*
Conclusion. *The results of the work show that it is particularly important to optimize the geometric parameters of the traction devices when they are operating on a monorail track with a radius of curvature of less than 1500 mm, where the value of each parameter significantly affects the resulting loads and their inconsistency leads to premature failure of the drive units and bending of the monorail. Thus, a preliminary assessment of the geometric parameters of the traction device with a mathematical model describing the geometry of the process of passing horizontal curves allows increasing the performance and quality of the traction force transmission as well as the reliability of the transport monorail systems.*

Keywords: *traction device, drive wheel, monorail, the curve radius, pressing force.*

Сведения об авторе
М.П. Кондратенко
SPIN-код: 4779-4049
Телефон: +380 (62) 301-03-37
Эл. почта: patent@donntu.org

Статья поступила 28.05.2019 г.
© М.П. Кондратенко, 2019
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин



УДК 621.001.2

В.П. Кондрахин /д.т.н./, Д.А. Демёшин
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПРИВОДА МАШИНЫ ПРИ СРАБАТЫВАНИИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ МУФТЫ С РАДИАЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ШАРИКОВ

Разработана математическая модель для имитационного моделирования процесса срабатывания предохранительной муфты с радиальным движением шариков в приводе машины при упруго-вязком стопорении ее исполнительного органа.

Ключевые слова: *математическая модель, динамика, привод, предохранительная муфта, шарик, радиальное движение.*

Постановка проблемы

При внезапном стопорении исполнительных органов горных, транспортных, дорожно-строительных, дробильных машин возникают экстренные перегрузки, для защиты от которых используются различные типы предохранительных устройств. В том числе широкое применение находят шариковые предохранительные муфты. Процесс срабатывания таких муфт сопровождается повторяющимися ударами шариков одной полумуфты о шарики или пазы другой, что приводит к формированию динамических нагрузок в трансмиссии привода машины. Как показывает опыт эксплуатации дробилок, эти нагрузки могут существенно превышать номинальное значение момента срабатывания муфты [1,2].

Анализ последних исследований и публикаций

Вопросы динамики привода машин с шариковыми и кулачковыми предохранительными муфтами рассмотрены в работах [3…7]. Однако в указанных работах отсутствуют расчетные схемы и математические модели, позволяющие в вычислительном эксперименте адекватно воспроизводить процесс срабатывания перспективных шариковых муфт с радиальным движением шариков [8].

Особенность муфт с радиальным движением шариков, которая не учитывается в известных работах, заключается в том, что на шарики, кроме силы сжатия пружины, действуют силы инерции, которые увеличивают силу прижатия шариков при вращении ведомого звена и исчезают при его стопорении. За счет этого существенно уменьшаются ударные нагрузки в приводе при срабатывании предохранительной муфты, вызванном стопорением исполнительного органа.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является разработка математической модели процесса срабатывания предохранительной муфты с радиальным движением шариков в составе привода машины при экстренном стопорении ее исполнительного органа.

Основной материал исследования

Для составления расчетных схем шариковой предохранительной муфты с радиальным движением шариков приняты следующие допущения: нагрузка на все шарики распределяется равномерно; шарики рассматриваются как абсолютно твердые материальные точки с одинаковым законом движения; упругие элементы муфт и трансмиссии рассматриваются как линейные; трение шариков – кулоново.

На рис. 1 представлена расчетная динамическая схема для моделирования динамических процессов в трансмиссии машины с шариковой предохранительной муфтой, в конструкции которой предусматривается движение шариков в радиальном направлении.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: $I_{1м}$, $I_{2м}$ – массовые моменты инерции полумуфт с присоединенными к ним массами трансмиссии и приводного двигателя; I_3 – момент инерции исполнительного органа машины с присоединенными массами; $y_ш$ – перемещение шарика в радиальном направлении; $C_{кр}$, $\beta_{кр}$ – коэффициенты жесткости и сопротивления участка трансмиссии от предохранительной муфты до заклиненного валка; δ – зазор в трансмиссии привода машины; c, β – коэффициенты жесткости и сопротивления пружины предохранительной муфты; $c_{пр}$, $\beta_{пр}$ – коэффициенты жесткости и сопротивления препятствия, вызвавшего аварийное стопорение исполнительного органа машины.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

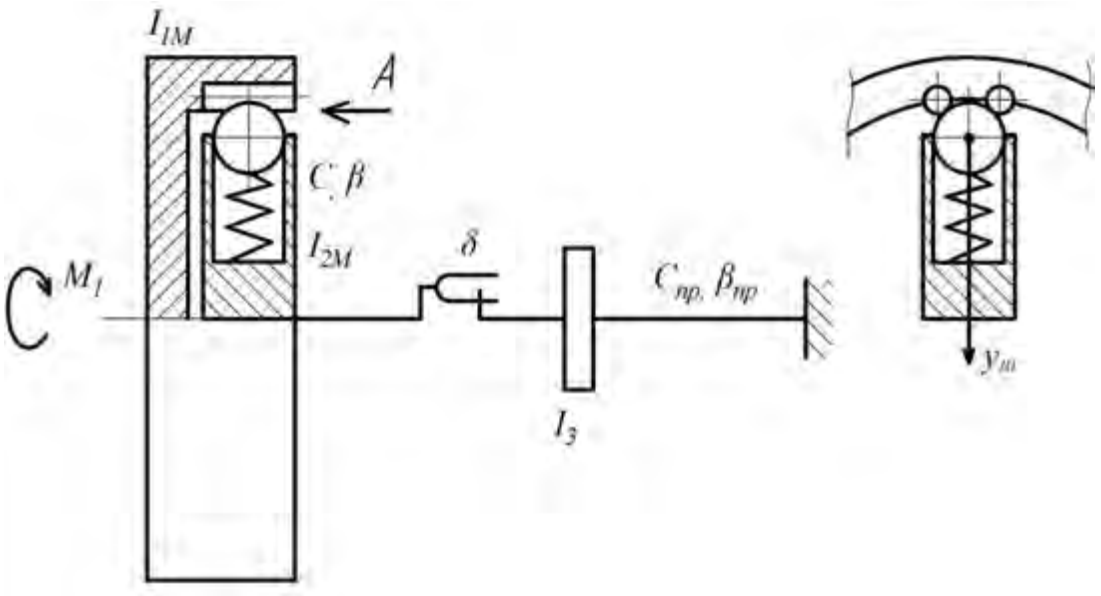


Рис. 1. Расчетная схема для моделирования процесса срабатывания муфты с радиальным движением шариков

Движение рассматриваемых масс муфты в общем случае описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} I_{1м}\ddot{\varphi}_{1м} + Q_x R_м = M_1, \\ I_{2м}\ddot{\varphi}_{2м} - Q_x R_м = M_2, \\ (m_1 + m_2)\ddot{y}_ш + \left[m_1(R_м - y_ш) + m_2(R_2 - y_ш)\right]\times \\ \times \dot{\varphi}^2_{2м} + \left|Q_x\right| f_{пр} \operatorname{sign} \dot{y}_ш + \beta\dot{y}_ш + Cy_ш + F_{нт} = Q_y, \\ I_3\ddot{\varphi}_3 + \beta_{пр}\dot{\varphi}_3 + C_{пр}\varphi_3 = -M_2, \end{cases} \quad (1)$$

где M_1, M_2 – крутящие моменты, действующие на полумуфты;

$$M_2 = \begin{cases} C_{пр}(\varphi_3 - \varphi_{2м}) + \beta_{пр}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_{2м}), \\ при\ (\varphi_3 - \varphi_{2м}) > 0, \\ 0,\ при - \delta \le (\varphi_3 - \varphi_{2м}) \le 0, \\ C_{пр}(\varphi_3 - \varphi_{2м} + \delta) + \beta_{пр}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_{2м}), \\ при\ (\varphi_3 - \varphi_{2м}) < -\delta. \end{cases}$$

Q_x и Q_y – окружная и радиальная составляющие результирующей реакции Q, возникающей при взаимодействии шариков с цилиндрическими армирующими вставками; $R_м$ – радиус окружности, на которой расположены центры шариков; $f_{пр}$ – приведенный коэффициент трения шарика при его радиальном перемещении; $\varphi_{1м}$, $\varphi_{2м}$, $\varphi_{3м}$ – углы поворота соответствующих масс; m_1 – масса шариков; m_2 – масса пружин и дополнительных грузов; R_2 – расстояние от оси вращения до центра масс системы «дополнительный груз – пружина»; $F_{нт}$ – усилие предварительного сжатия пружины.

Все рассмотренные параметры приведены к валу, на котором расположена предохранительная муфта.

При моделировании процесса срабатывания предохранительной муфты можно в первом приближении не учитывать момент M_1, действующий на большой шкив со стороны приводного электродвигателя, так как в большинстве машин после экстренного стопорения исполнительного органа электродвигатель автоматически отключается.

Начальные условия для решения системы (1): t=0; $y_ш$=$\dot{y}_ш$=0; $\varphi_{1м}$=$\varphi_{2м}$=$\varphi_{3м}$=0; $\dot{\varphi}_{1м} = \dot{\varphi}_{2м} = \dot{\varphi}_3 = \omega_0$, где ω_0 – номинальная частота вращения вала, на котором размещена муфта.

При стопорении исполнительного органа машины происходит закручивание валопровода трансмиссии и рост крутящего момента, при этом полумуфты движутся на 1-м этапе совместно ($\varphi_{1м} \equiv \varphi_{2м}$; $y_ш \equiv 0$) Поэтому в системе (1) для 1-го этапа вместо первых трех уравнений используется одно:

$$(I_{1м} + I_{2м}) \cdot \ddot{\varphi}_{2м} = M_1 + M_2. \quad (2)$$

Усилия Q_x и Q_y для 1-го этапа определяются по выражениям:

$$Q_x = (I_{2м}\ddot{\varphi}_{2м} - M_2)R_м^{-1},$$

$$Q_y = Q_x \operatorname{tg}(\alpha_H - \rho), \quad (3)$$

где ρ – угол трения шариков о цилиндрические поверхности контакта; α_H – начальный угол контакта (рис. 2).

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Условие существования 1-го этапа:

$$Q_y \le F_{нп} + \dot{\varphi}_{2м}^2[m_1(R_м - y_ш) + m_2(R_2 - y_ш)] + Q_x f_{пр}. \quad (4)$$

Когда условие (4) не выполняется, начинается взаимное проскальзывание шариков.

Траектория движения центра шарика при его скольжении по профилю ведущей полумуфты (2-й этап) для наиболее простого и практически целесообразного случая, когда количество шариков равно 2, а форма поверхности контакта цилиндрическая, приведена на рис. 2 (линия AGHB).

При отсутствии разрыва контакта между шариками и цилиндрической поверхностью ведущей полумуфты траектория движения центра шарика определяется выражением:

$$y_{пр} = \begin{cases} \sqrt{R^2 - (x_ш - b - x_0)^2} - a, \\ при\ \ x_0 < x_ш \le x_1, \\ R - a - p,\ при\ \ x_1 < x_ш \le x_2, \\ \sqrt{R^2 - (x_ш - b - 2b_1 - l - x_0)^2} - a, \\ при\ \ x_2 < x_ш \le \pi R_м K_n. \end{cases} \quad (5)$$

где $x_1=x_0+b+b_1$; $x_2=x_1+l$; $R=R_ш+R_ц$; $x_0=\pi R_м(K_n-1)$; $l=\pi R_м-2(b+b_1)$; $b_1=[R^2-(R-p)^2]^{1/2}$; $R_ш$, $R_ц$ – радиусы шарика и цилиндрической поверхности контакта; K_n – порядковый номер повторяющихся участков профиля длиной $\pi R_м$.

Параметр p представляет собой размер выступающей части цилиндрической поверхности, с которой контактирует шарик (рис. 2). Величина этого параметра оказывает существенное влияние на величину динамических нагрузок при срабатывании муфты, и его оптимальное значение должно определяться с использованием разработанной математической модели.

При рассмотрении 2-го этапа (скольжение по профилю без потери контакта) следует иметь в виду, что удар шарика о профиль происходит не только в конце профиля (точка B на рис. 2), но также в точках G и H, в которых происходит мгновенное изменение скорости центра шарика.

Составляющая Q_y усилия взаимодействия шарика с профилем в данном случае запишется в виде:

$$Q_y = ((m_1 + m_2)\ddot{y}_ш + (m_1(R_м - y_ш) + m_2(R_2 - y_ш))\dot{\varphi}_{2м}^2 + Cy_ш + \beta\dot{y}_ш + F_{нп}) \times \times (1 - f_{пр}\,\mathrm{sign}\,\dot{y}_ш \cdot \mathrm{ctg}(\alpha - \rho))^{-1}, \quad (6)$$

где

$$\alpha = \begin{cases} \arccos\left(\frac{x_0 + b - x_ц}{R}\right),\ при\ \ x_0 < x_ц \le x_1, \\ \frac{\pi}{2},\ при\ \ x_1 < x \le x_2, \\ \arccos\left(\frac{x_ц - x_2 - b_1}{R}\right),\ при\ \ x_2 < x_ц \le \pi R_м K_n. \end{cases}$$

Условие существование режима скольжения без потери контакта между шариками:

$$N = Q_y \sin\alpha + Q_x \cos\alpha \ge 0. \quad (7)$$

В случае, если в процессе проскальзывания выполняется условие $x_ш=2K_nb$, происходит удар шарика одной полумуфты по следующему по порядку армирующему цилиндрическому элементу (точка B на рис. 2). В случае невыполнения условия (7) происходит отрыв шарика от армирующего цилиндрического элемента.

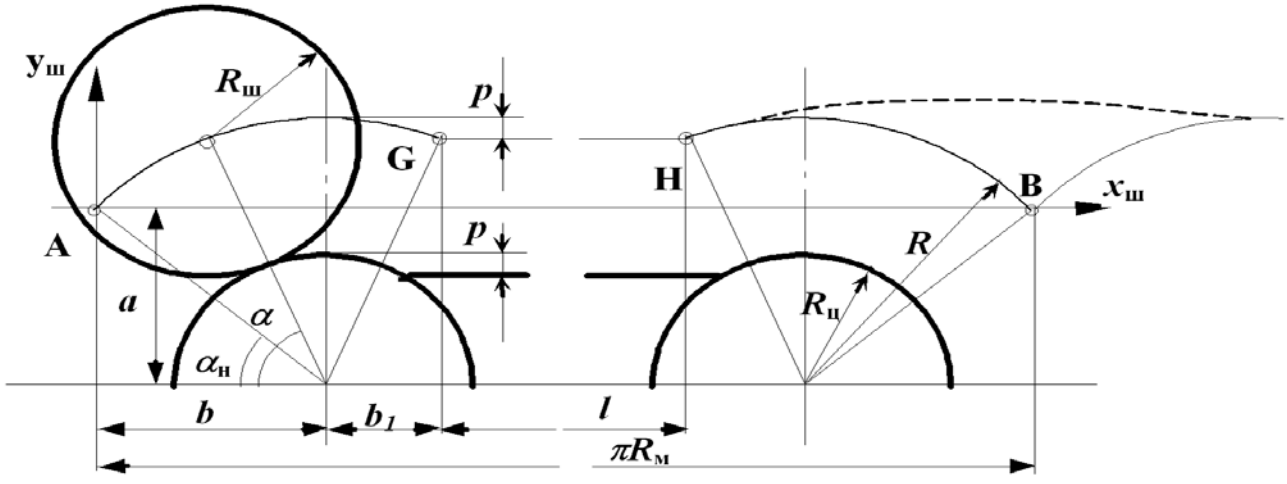


Рис. 2. Развертка траектории движения шарика предохранительной муфты с радиальным перемещением шарика

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В системе (1) в этом случае следует положить $Q_x=Q_y\equiv 0$. Независимое движение рассматриваемых масс будет продолжаться до тех пор, пока соблюдается условие $y_ш \geq y_{пр}$. После потери контакта шариков его восстановление сопровождается ударом.

Угловая скорость ведущей полумуфты, которая связана с приводным электродвигателем или большим шкивом ременной передачи, при ударах изменяется незначительно, так как $I_{1м}>I_{2м}$, и этими изменениями можно пренебречь.

Задача определения скоростей соударяющихся тел применительно к шариковой предохранительной муфте с осевым перемещением шариков подробно рассмотрена в работе [7]. Полученные формулы применимы и к рассматриваемой задаче. Найденные значения скоростей служат начальными условиями для решения системы уравнений (1) на следующем этапе движения.

При моделировании процесса выбега ведущей полумуфты совместно с приводным двигателем и трансмиссией закон движения массы $I_{1м}$ принимается равнозамедленным, то есть $\dot{\varphi}_{1м}=\dot{\varphi}_{10}-\varepsilon_y t$, где $\varepsilon_y<0$ – постоянное угловое ускорение (замедление) ведущей полумуфты; $\dot{\varphi}_{10}$ – номинальная угловая скорость ведущей полумуфты.

Выводы

Уравнения (1)…(7) в совокупности представляют собой математическую модель, позволяющую в процессе вычислительного эксперимента моделировать процесс срабатывания предохранительной муфты с радиальным движением шариков, оценивать эффективность муфты рассматриваемого типа и определять оптимальные значения ее параметров.

Список литературы

1. Кондрахин, В.П. Экспериментальные исследования двухвалковой зубчатой дробилки ДДЗ-6А / В.П. Кондрахин, Ф.Л. Лаевский, Н.Н. Мотин // Тяжелое машиностроение. – 1992. – №10. – С. 16-18.
2. Клендий, А.Н. Результаты экспериментальных исследований винтового конвейера с предохранительной муфтой // Евразийский союз ученых. – 2016. – №3-3(24). – С. 32-35.
3. Исследование процессов срабатывания низкодинамичных шариковых предохранительных муфт с замкнутыми круговыми профилями элементов зацепления (укр.) / Р.Б. Гевко [и др.] // Вестник ХНТУ. – 2018. – №1(64). – С. 23-33.
4. Hevko, R.B. The investigation of the process of a screw conveyer safety device actuation / R.B. Hevko, O.M. Klendiy // INMATEH: Agricultural engineering. – 2014. – No.1. Vol.42. – P. 55-60.
5. Hevko, R.B. Development of design and investigation of operation processes of loading pipes of screw conveyors / R.B. Hevko, R.I. Rozum, O.M. Klendii // INMATEH: Agricultural engineering. – 2016. – No.3. Vol.50. – P. 89-94.
6. Popa, S. Torque transmitted by safety clutches with balls and spherical rabbets radial disposed / S. Popa, G. Moldovean, E. Eftimie // Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering. – 2014. – No.1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.imtuoradea.ro/auo.fmte/
7. Кондрахин, В.П. Математическая модель процесса формирования динамических нагрузок в приводе машины при срабатывании шариковой предохранительной муфты / В.П. Кондрахин, М.С. Хурчак // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 3-й Межд. науч.-практ. конф., 24-25 мая 2017 г., Донецк. В 9 т. Т.3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 54-58.
8. Патент Украины №34616 А. Предохранительное устройство дробилки / В.П. Кондрахин, В.И. Трубчанин, В.В. Трубчанин. – Приоритет от 4.08.1998; опубл. 15.03.2001; бюл. №2.

V.P. Kondrakhin /Dr. Sci. (Eng.)/, D.A. Demeshin
Donetsk National Technical University (Donetsk)

MATHEMATICAL MODEL OF THE MACHINE DRIVE DYNAMICS DURING THE OPERATION OF THE SAFETY CLUTCH WITH THE RADIAL MOTION OF THE BALLS

Background. *In case of sudden blocking of working bodies of mining, transport, road-building, agricultural, crushing machines, there are emergency overloads. Various types of safety devices including ball-type safety clutch are used to protect against these overloads. The process of actuation of such clutches accompanied by repeated blows of the balls of one clutch half on the balls or grooves of the other, which leads to the formation of dynamic loads in the drive of the machine.*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Materials and/or methods. *Reasonable assumptions formulated and the calculation of the dynamic driving scheme of the machine with a ball safety clutch developed. A clutch with a radial movement of the balls is used, which provides a reduction in shock loads when triggered. The prospective variant of the clutch design considered in which the balls interact with the contact surface of a cylindrical shape. The design scheme takes into account in a linear setting the elastic-dissipative properties of the transmission and stopping obstacles, and the presence of a gap in the transmission. Differential equations presented of drive elements and balls motion in the process of clutch actuation at sudden stop of the working body and free running of the drive when the engine is disengaged. Centrifugal forces of inertia acting on balls and springs accounted for the first time. The stage of sliding the balls on the contact surfaces and the stage of separation of the balls from the contact surface, which ends with a blow when the contact restored, are considered.*

Results. *A mathematical model of the dynamics of a machine equipped with a safety clutch with the radial motion of balls obtained in the form of systems of nonlinear differential equations of the 2nd order and logical conditions of transition from one system to another in the process of the numerical solution.*

Conclusion. *The obtained mathematical model used in the design and optimization of parameters of ball safety clutches of prospective design with the radial movement of balls as a part of mining, transport, earthmoving and other types of machines.*

Keywords: *mathematical model, dynamics, drive, safety clutch, ball, radial motion.*

Сведения об авторах

В.П. Кондрахин
SPIN-код: 9628-3575
Author ID: 6506839592
Телефон: +380 (71) 334-90-07
Эл. почта: vkondrakhin52@mail.ru

Д.А. Демёшин
Телефон: +380 (71) 451-90-11
Эл. почта: demeshin.dmitriy@gmail.com

Статья поступила 23.04.2019 г.
© В.П. Кондрахин, Д.А. Демёшин, 2019
Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 622.2 (26.03)

В.Б. Малеев /д.т.н./, Н.И. Скорынин /к.т.н./, А.А. Кудрявцев
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ГИДРОСМЕСИ В ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЕ ЭРЛИФТА

Разработаны алгоритмы регулирования гидросмеси в подающем трубопроводе эрлифтной установки и контроля критического режима транспортирования гидросмеси.

Ключевые слова: *гидросмесь, подъемная труба, эрлифтная установка, переходный процесс регулирования, критический режим (забутовка), перепад давлений.*

Постановка проблемы

Как известно, в технологических процессах добычи полезных ископаемых со дна водоемов, удаления осевших твердых частиц из водоотливных емкостей шахт эрлифтный гидравлический подъем выполняет важную роль.

При этом следует отметить, что управление рабочим режимом гидравлического подъѐма в значительной мере зависит от концентрации гидросмеси в подъемной трубе эрлифта, которая, в свою очередь, зависит от концентрации гидросмеси в транспортном (подающем) трубопроводе. В этом случае при минимуме энергозатрат на получение объемной концентрации гидросмеси мощность подводимого к смесителю эрлифта сжатого воздуха будет минимальной.

Все вышеприведенное определяет значимость разработки системы автоматического регулирования и контроля концентрации гидросмеси в подъемной трубе эрлифтной установки.

Анализ последних исследований и публикаций

В работах [1,4…6] показано, что вывод эрлифта на расчетный рабочий режим по концентрации гидросмеси осуществляется путем ее регулирования, определения такого значения концентрации, при котором энергозатраты на гидроподъем близки к минимальным. Однако в этих работах не сказано, как этого можно достичь.

Цель (задачи) исследования

Цель настоящего исследования – разработать систему автоматического регулирования расхода гидросмеси и ее концентрации в транспортном (подающем) трубопроводе эрлифтной установки.

Основной материал исследования

Основным режимом управления гидравлическим эрлифтным гидроподъемом является оптимальное управление концентрацией твердого материала в подъемном трубопроводе с целью повышения эффективности работы эрлифта за счет минимизации энергозатрат на подъем заданного количества твердого [1…3].

Ниже приводится последовательность действий и операций, реализуемых в процессе решения задачи автоматического регулирования расхода гидросмеси в транспортном трубопроводе (рис. 1). Начало решения задачи – в символе 1, в символе 2 осуществляется ввод необходимой входной информации для рассматриваемого режима. В символе 3 производится анализ задания на расход гидросмеси в транспортном трубопроводе $Q_{гсТТз}$.

Если $Q_{гсТТз}$ изменилось (отличается от задания на предыдущем цикле задачи), то выполняется переход на символ 4, если нет – переход на символ 16. В символе 16 производится контроль приближения к критическому режиму и формируется признак a, в символе 17 проверяется признак a, характеризующий режим гидроподъема. Если a=1, т.е. текущий расход гидросмеси близок к критическому – производится переход на символ 21, если нет – на символ 18. Символы 18…20: если признак a изменил состояние из 1 в 0, т.е. в данный момент произошел выход из критического режима, то сбрасывается признак ограничения по расходу гидросмеси $K_к$=0 и устанавливается признак $T_г$=0.

Если признак a не изменил своего состояния (нормальный режим работы), то производится переход на символ 21, в котором устанавливается стабилизируемый уровень расхода гидросмеси $Q_{гсс}$, равный заданному $Q_{гсз}$. В символе 22 производится анализ признака a. Если признак a изменил состояние из 0 в 1 (приближение к зоне критического расхода), запоминается текущий расход $Q_{гс}$ (символ 23) как критический $Q_{гскр}$ и устанавливается признак ограничения $K_к$=1 (символ 24).

В символе 25 производится анализ задания $Q_{гсз}$. Если $Q_{гсз}$<1,1$Q_{гскр}$, осуществляется переход на символ 26 (нормальный режим), если нет –

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

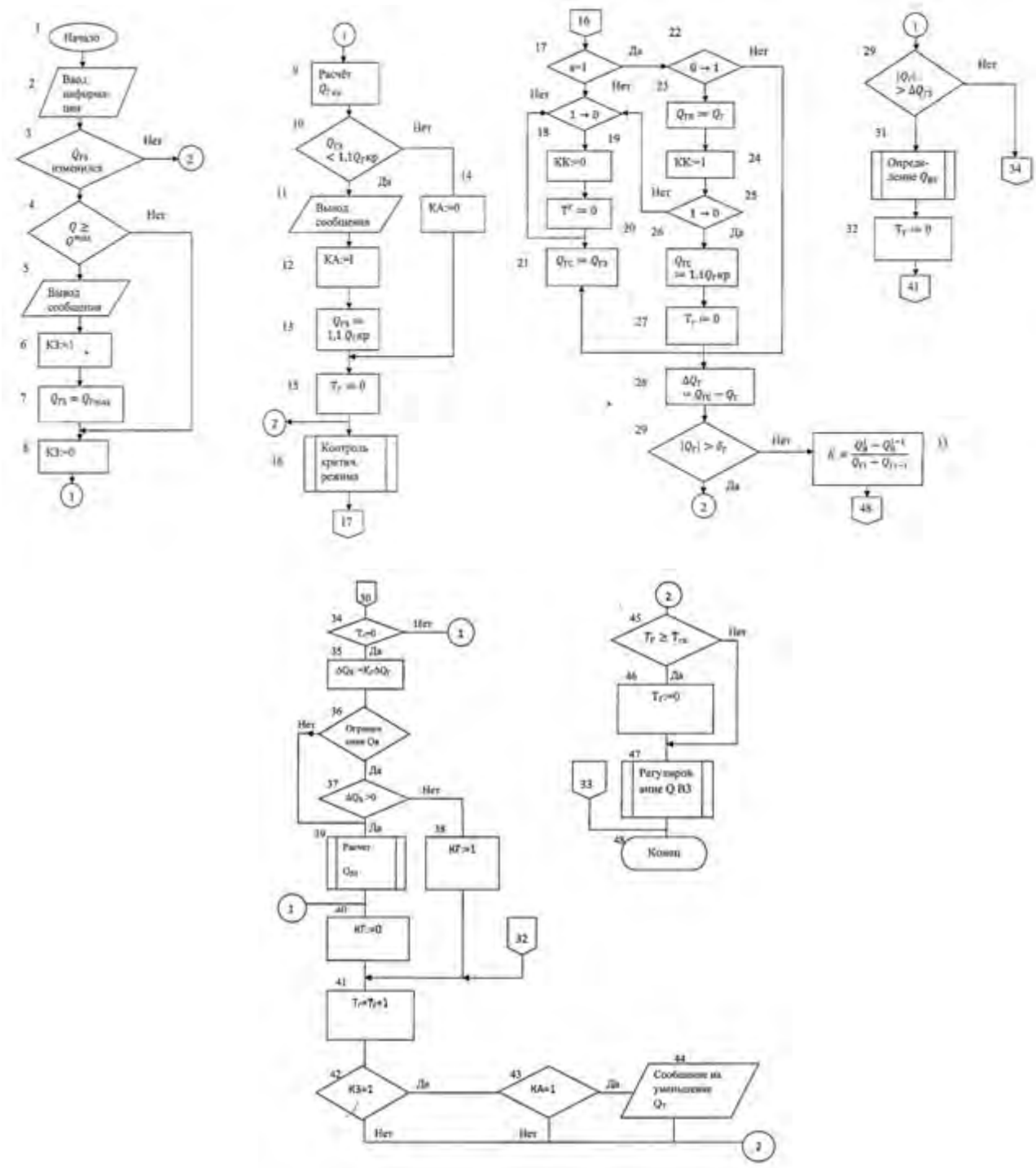


Рис. 1. Алгоритм регулирования гидросмеси в подающем транспортном трубопроводе эрлифтной установки

на символ 19. Затем устанавливается стабилизируемый уровень расхода гидросмеси, равный минимальному надкритическому (символ 26).

Символ 27 устанавливает признак начала переходного процесса по расходу гидросмеси. Рассчитывается отклонение $\Delta Q_{гс}$ текущего расхода гидросмеси $Q_{гс}$ от заданного $Q_{гсс}$ (стабилизуемого) (символ 28).

В символах 29, 30 производится анализ отклонения $\Delta Q_{гс}$. Если $|\Delta Q_{гс}|<\delta_г$ (где $\delta_г$ – заданная зона нечувствительности регулирования), выполняется переход на символ 33. Если $|\Delta Q_{гс}|\le\Delta Q_{гсз}$ (где $\Delta Q_{гсз}$ – уровень отклонения, при котором меняется алгоритм формирования управляющего воздействия), осуществляется переход на символ 34, если нет – на символ 31. В последнем определяется требуемый расход воздуха $\Delta Q_{вз}$ в смеситель в зависимости от задания на расход $\Delta Q_{гс}$ гидросмеси, концентрации S и среднего размера d_T частиц твердой фазы. В символе 32 устанавливается признак начала переходного процесса по гидросмеси ($T_г$=0). Рас-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

считывается передаточный коэффициент объекта в рабочей точке на расходной характеристике эрлифта $K_г$ через значения расходов гидросмеси и воздуха в смеситель на i-м шаге регулирования ($Q_{гсi}$, $Q_{вi}$) и на предыдущем шаге (символ 33). В символе 34 проверяется время переходного процесса. Если переходный процесс по расходу гидросмеси закончен $T_г$=0, осуществляется переход на символ 35, если нет – на символ 40.

Символ 35 определяет требуемое приращение $\Delta Q_в$ воздуха по отклонению текущего расхода гидросмеси от заданного $\Delta Q_{гс}$. Анализируется режим работы системы по расходу воздуха (символ 36). Если есть ограничение по расходу воздуха, то выполняется переход на символ 37, если нет – на символ 39. Производится анализ полученного в результате расчета приращения воздуха (символ 37). Если $\Delta Q_в$>0, осуществляется переход на символ 39, если нет – на символ 38, в котором устанавливается признак ($K_г$=1) ограничения по расходу гидросмеси. Определяется требуемый расход воздуха как задание на расход воздуха, полученное на предыдущем цикле решения задачи (символ 39).

Полученное значение $Q_{вз}$ передается задаче регулирования расхода воздуха в смеситель. Сбрасывается признак ($K_г$=0) ограничения по расходу гидросмеси (символ 40), и производится расчет времени переходного процесса (символ 41).

Если установлен признак ограничения по максимуму и минимуму, т.е. при максимальном расходе гидросмеси и при заданном расходе твердой фазы система подъема работает в режиме критических расходов, то выводится сообщение о необходимости уменьшения расхода твердой фазы с целью вывода системы подъема из критического режима за счет уменьшения расхода твердой фазы (символы 42…44). Производится контроль времени переходного процесса (символы 45, 46) по расходу гидросмеси. Если время с момента вывода управляющего воздействия превысило заданное значение, устанавливается признак конца переходного процесса ($T_г$=0) по предыдущему возмущению.

Решается задача регулирования расхода воздуха в смеситель (символы 47,48), и на этом очередной шаг завершается.

На рис. 2 приведен алгоритм контроля приближения к критическому режиму транспортирования гидросмеси в транспортном (подающем) трубопроводе. Здесь формируется признак приближения к критическому режиму a.

В начале каждого шага (символы 1…3) производится ввод значений расходов гидросмеси $\Delta Q_{гс}$ и избыточного давления в трубопроводе на концах контрольного участка $P_н$, $P_к$ и определяется перепад давлений на этом участке.

При работе системы гидроподъема на воде (анализ режима в символе 4) производится запоминание значения $Q_в$ и соответствующего ему значения ΔP (символ 5). При работе на гидросмеси в символе 6 производится расчет отношения удельных потерь напора при текущем расходе гидросмеси к потерям при таком же расходе воды ($i_{гс}/i_o$) с учетом средней плотности гидросмеси в контрольном участке ($\bar{\rho}_{гс}$) и его длины (l).

Полученное значение – ($i_{гс}/i_o$) (анализ в символе 7). При $i_{гс}/i_o \geq (i_{гс}/i_o)_з$, что соответствует приближению к критическому режиму, устанавливается признак a=1 и выводится сообщение (символы 8, 9). При $i_{гс}/i_o<(i_{гс}/i_o)_з$ сбрасывается признак a (символ 10), и шаг на этом завершается (символ 11).

Алгоритм автоматического регулирования концентрации гидросмеси приведен на рис. 3. В символах 1, 2 начало операции и вводится входная информация, необходимая для решения задачи. Затем анализируется величина задания на концентрацию гидросмеси в транспортном трубопроводе (символы 3, 4). Если задание изменилось более чем на 10 % по сравнению с предыдущим циклом решения задания, осуществляется переход на символ 5, если нет – на символ 6. В символе 5 по заданному расходу $\Delta Q_{тз}$ и концентрации $S_з$ определяется требуемый расход гидросмеси $Q_{тгс}$. Производится анализ задания $Q_{тз}$ на расход твердой фазы (символы 6, 7), и если оно изменилось более чем на 10 % по сравнению с предыдущим циклом решения задачи, то выполняется переход на символ 5, если нет – на символ 9. В символе 8 производится регулирование расхода гидросмеси.

Сравнивается заданная концентрация $S_з$ с текущей S (символ 9). Если $S_з$, то осуществляется переход на символ 8, если нет – на символ 10. В последнем контролируется переходный процесс по расходу гидросмеси и, если он закончен ($T_г$=0), выполняется переход на символ 11, если нет – на символ 8. В символе 11 производится расчет отклонения текущей концентрации от заданной ΔS.

Анализ отклонения ΔS осуществляется в символе 12. Если $|\Delta S|>\delta_з$, где $\delta_з$ – зона нечувствительности системы регулирования концентрации, производится переход на символ 13, если нет – на символ 8.

Проверяется наличие ограничения по расходу гидросмеси в соответствии с выражением $K_{ов}$=1 (символ 13).

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

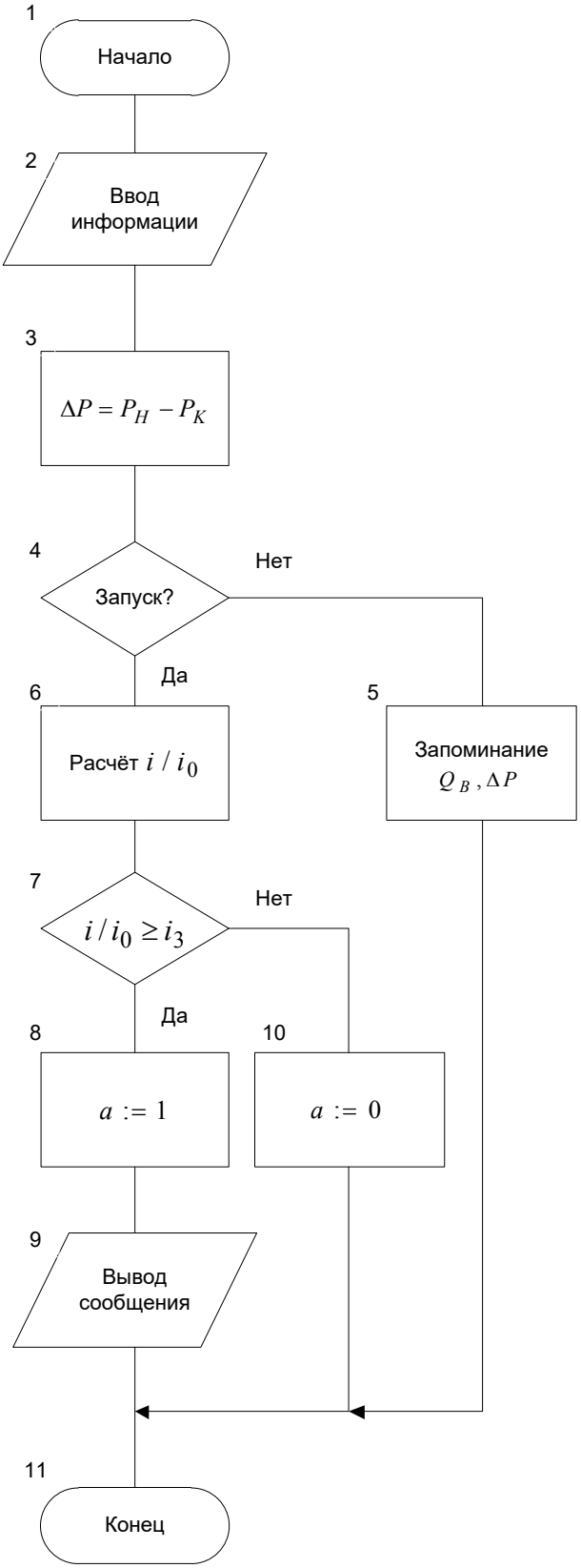


Рис. 2. Алгоритм контроля приближения к критическому расходу гидросмеси

В символах 14…16 производится анализ ограничения по расходу гидросмеси и отклонения текущего значения концентрации от заданного (ΔS). Если есть ограничение по расходу гидросмеси сверху и $\Delta S>0$ или ограничение снизу и $\Delta S\leq 0$, то выполняется переход на символ 17, в противном случае – на символ 18. В символе 17 рассчитывается задание на расход гидросмеси, а в символе 18 – конец решения задачи.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

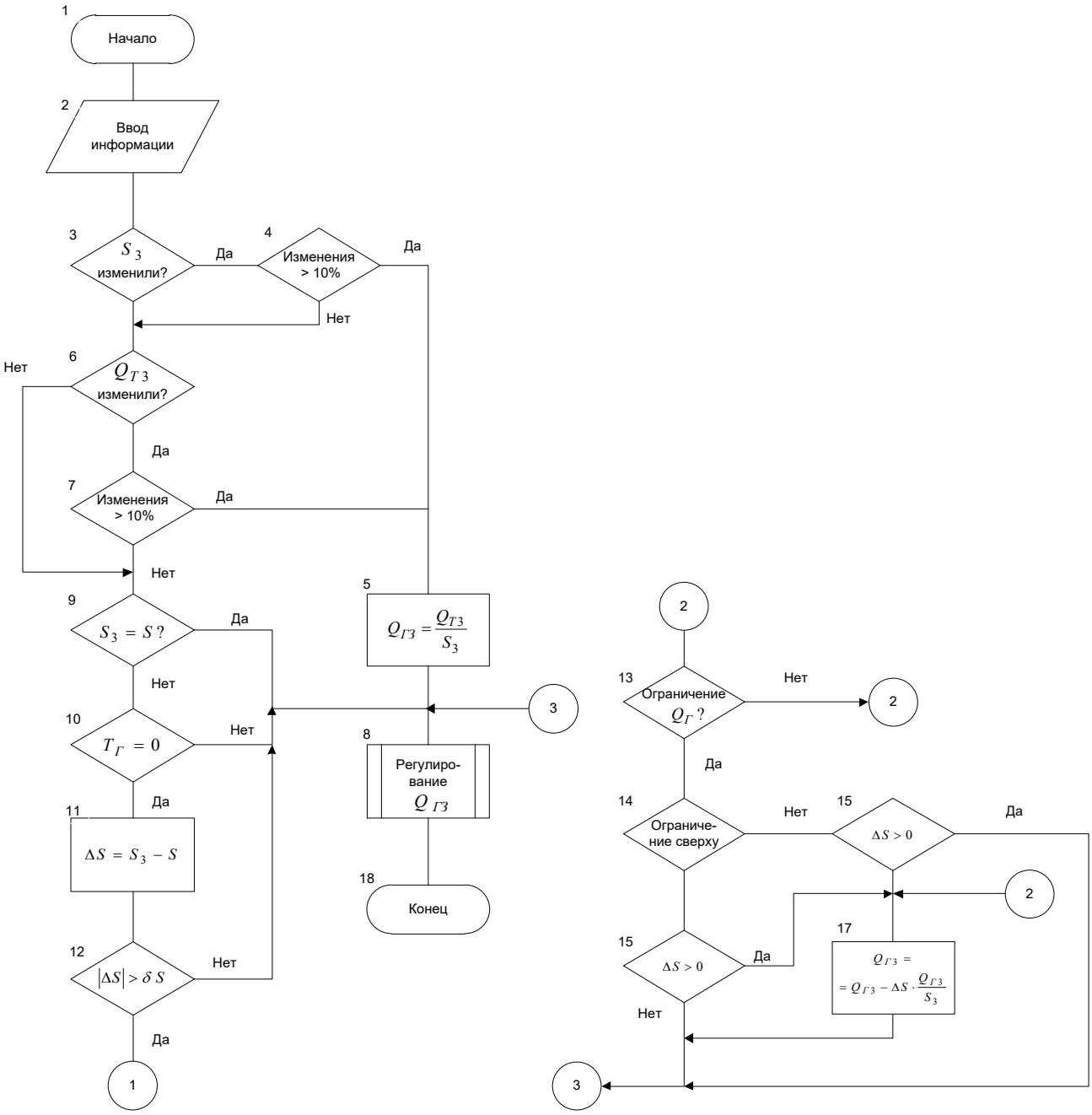


Рис. 3. Алгоритм автоматического регулирования концентрации гидросмеси

Выводы

Выполненные исследования позволили разработать алгоритмы регулирования гидросмеси в подающем (подъемном) трубопроводе эрлифтной установки и контроля критического режима транспортирования твердого, что позволяет исключить забутовку трубопровода.

При оптимальном по минимуму энергозатрат значении объемной концентрации гидросмеси мощность подводимого к смесителю сжатого воздуха будет минимальной.

Дальнейшие исследования будут направлены на возможности транспортирования эрлифтной установкой твердого материала повышенной плотности (2000…7000 кг/м^3).

Список литературы

1. Малеев, В.Б. Характеристика задач управления глубоководным эрлифтным гидроподъёмом полезных ископаемых / В.Б. Малеев, А.А. Кудрявцев // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». – 2018. – №12 (55). – С.71-76.
2. Исследование устойчивости системы автоматического регулирования многосмесительных эрлифтных гидроподъёмов / В.Б. Малеев [и др.] // Материалы XV Международной научно-технической конференции «Горная энергомеханика и автоматика», 24-27 ноября 2015 г., г. Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – С. 24-36.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

3. Работа компрессора на эрлифтный гидроподъѐм при осушении скважин и стволов / В.Б. Малеев [и др.] // Научные труды ДонНТУ. Серия горно-геологическая. – 2016. – №2(25). – С. 24-34.
4. Wakton, W.H. Aerodynamic Capture of Particles / W.H. Wakton, A. Woolcock. – N.Y.: Pergamon, 1960. – 129 p.
5. Soo, S.L. Fluid Dynamics of Multiphase System // Proceedings of Symposium on Interaction between Fluids and Particles, London, June 20-22, 1962. – London: Ins. of Chem. Eng., 1962. – P. 50.
6. Peskin, R.L. Particle-Particle and Particle-Fluid Interactions in Two-Phase Turbulent Flow // Conference Proceedings of Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, Stanford, Calif., June 15-17, 1960. – Stanford U.P, 1960. – P. 114-121.

V.B. Maleev /Dr. Sci. (Eng.)/, N.I. Skorynin /Cand. Sci. (Eng.)/, A.A. Kudryavtsev
Donetsk National Technical University (Donetsk)

AUTOMATIC REGULATION OF THE SLURRY CONCENTRATION IN THE AIRLIFT PIPE

Background. *The new technical solution presented to a problem of optimal control of the hydraulic airlift working mode, which is mainly dependent on the concentration of slurry in the lifting pipe of an airlift. In this case, the power of the compressed air supplied to the mixer will be minimal when the volume concentration of the hydraulic mixture is at the lowest possible energy consumption. All of the above given determines the significance of the development of the automatic control system of the concentration of slurry in the lifting pipe of airlift installation.*
Materials and/or methods. *The analysis of the task for the flow of the hydraulic mixture in the transport pipeline performed, and when it approaches the critical mode, the corresponding mode of hydraulic lifting fixed. At the same time, a stabilized level of the hydraulic mixture flow established, equal to the minimum supercritical one. It is shown that the required air flow rate to the mixer is set depending on the flow rate of the hydraulic mixture, the concentration and the average size of the solid phase particles. The control algorithm of the approach to a critical mode of transportation of a hydraulic mixture in the transport (feed) pipelines is shown. In this case, the ratio of specific losses at the current flow rate of the hydraulic mixture to losses at the same water flow rate is calculated taking into account the average density of the hydraulic mixture in the control area and its length. The control system compares the specified concentration of solid particles with the current one and controls the transition process at the flow rate of the mixture. If the deviation of the solid concentration is higher than the dead zone of the concentration control system, the presence of a limit on the flow of the hydraulic mixture checked.*
Results. *The performed studies allowed developing the control algorithms for slurry in the feed (lift) pipe of the airlift installation and control of a critical mode of transportation of solid, eliminating the pipeline filling.*
Conclusion. *With the optimal minimum energy consumption value of the volume concentration of the hydraulic mixture, the power of the compressed air supplied to the mixer will be minimal.*

Keywords: *slurry, lifting pipe, airlift installation, transient regulation, critical, differential pressure*.

Сведения об авторах

В.Б. Малеев
SPIN-код: 7651-9977
Телефон: +380 (71) 321-97-68
Эл. почта: teormeh@fimm.donntu.org

Н.И. Скорынин
SPIN-код: 1869-5382
Телефон: +380 (71) 330-18-85
Эл. почта: teormeh@fimm.donntu.org

А.А. Кудрявцев
SPIN-код: 5524-4958
Телефон: +380 (71) 302-85-39
Эл. почта: tmech_kaa@mail.ru

Статья поступила 25.04.2019 г.
© В.Б. Малеев, Н.И. Скорынин, А.А. Кудрявцев, 2019
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко

УДК 629.113

Н.В. Савенков /к.т.н./, В.В. Бутенко
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (Макеевка)

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ И БЕССТУПЕНЧАТОЙ ТРАНСМИССИИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Предложена методика рационального выбора режимных параметров силовой установки автомобиля, оснащенной двигателем внутреннего сгорания (ДВС) и бесступенчатой трансмиссией. Результаты получены на примере автомобилей категорий N_1 и N_3, оснащенных различными типами двигателей и бесступенчатых трансмиссий.

Ключевые слова: *автомобиль категории N_3, бесступенчатая трансмиссия, оптимизация, коэффициент полезного действия, передаточное число.*

Постановка проблемы

Известно, что процесс движения автотранспортного средства определяется мощностным балансом – равенством в каждый момент времени эффективной мощности двигателя сумме мощностей, затраченных на преодоление сил сопротивления движению, с учетом КПД трансмиссии и ходовой части [1].

Эффективная мощность, развиваемая ДВС, характеризуется нагрузкой и частотой вращения [2]. При различном сочетании угловой скорости коленчатого вала и коэффициента нагрузки, представляющего отношение эффективной мощности двигателя к максимально возможной при данной скорости вращения коленчатого вала, эффективный КПД ДВС и запас его мощности существенно различаются.

Бесступенчатая трансмиссия (вариатор) обеспечивает возможность плавного изменения передаточного числа (ПЧ).

При этом плотность ряда ПЧ в возможном диапазоне равна бесконечности.

Для коробки передач (КП) первого типа частота вращения коленчатого вала ДВС n всегда пропорциональна скорости движения автомобиля V, что обусловлено наличием нескольких фиксированных передаточных отношений, число которых равно количеству передач.

Для трансмиссий, оснащенных вариатором, становится возможным в определенных пределах варьировать нагрузкой и частотой вращения двигателя при постоянной мощности на движителях.

Таким образом, характерная для бесступенчатой трансмиссии степень свободы в выборе значений параметров регулирования ДВС при постоянной эффективной мощности обуславливает возможность создания алгоритмов управления двигателем и вариатором при обеспечении максимальных значений эффективного КПД силовой установки. Это позволяет улучшить тягово-скоростные и топливно-экономические эксплуатационные свойства автомобиля, а также его экологические качества.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время, в период развития и широкого распространения автомобилей с различными типами и компоновками силовых установок, ведутся всесторонние исследования по созданию алгоритмов их рационального регулирования и соответствующего выбора конструкционных параметров, например [3,4,5].

Цель (задачи) исследования

Основная цель настоящего исследования – на основе технических характеристик и экспериментальных данных для двигателя внутреннего сгорания и трансмиссионного вариатора разработать такой закон регулирования силовой установки, который обеспечит максимальное улучшение топливно-экономических показателей автотранспортного средства.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи: выбрать критерий оптимизации работы силовой установки и определить оптимизируемые параметры; создать математическую модель совместных характеристик ДВС и трансмиссии для режима частичных нагрузок; реализовать математическую модель в программной среде для оперативного и наглядного представления результатов; выбрать и рассмотреть для исследования в качестве примера характеристики конкретного ДВС и трансформатора и получить оптимальные функции параметров регулирования силовой установки.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Основной материал исследования

В качестве критерия оптимизации выбран путевой расход топлива транспортного средства, который, при прочих равных, обусловлен эффективным КПД силовой установки. Параметрами и функциями оптимизации являются: коэффициент использования мощности ДВС k, частота вращения двигателя, передаточное число трансмиссии.

В исследовании рассмотрена относительно распространенная компоновка трансмиссии автотранспортного средства, показанная на рис. 1. Принятая в качестве примера силовая установка состоит из ДВС СМД 31.15 и гидрообъемной бесступенчатой передачи типоразмера S21 фирмы Sauer, включающей аксиальный насос и аксиальный мотор (именуемой в дальнейшем «трансформатор»).

Оценка эффективности работы ДВС на различных эксплуатационных режимах выполняется на основе универсальной статической характеристики эффективных показателей (рис. 2). Диаграмма эффективной мощности и эффективного КПД в координатах частоты вращения и коэффициента нагрузки построена на основании экспериментальных данных [6] путем полиномиальной интерполяции.

Таким образом, если установлена связь между эффективными показателями нагрузочно-скоростной характеристики, которые определяют режим работы двигателя ($N_e=f(k,n)$, $\eta_e=f(k,n)$, то возможно проанализировать эффективность его работы в различных эксплуатационных условиях. Экономическая характеристика ДВС обуславливает такой режим его работы, при котором для каждого значения диапазона эффективной мощности обеспечивается максимальный эффективный КПД, η_e (рис. 2) [7]. Характеристика определена зависимостями частоты вращения коленчатого вала n и коэффициента использования мощности k от развиваемой эффективной мощности N_e.

В том случае, если КПД трансмиссионного трансформатора не зависит от изменения параметров энергосилового потока на входном валу (ускорения, частоты вращения и крутящего момента), а также от текущего передаточного числа и скорости его изменения (что в большей мере характерно для ступенчатых механических КП), то управление силовой установкой необходимо осуществлять в соответствии с экономической характеристикой двигателя (рис. 2). Это объясняется тем, что варьирование параметрами регулирования ДВС при обеспечении постоянства развиваемой мощности (с целью выхода на режим максимального эффективного КПД) не будет вызывать изменения текущего КПД трансформатора.

КПД трансформатора энергосилового потока является функцией от ряда параметров:

$$\eta_T = f(n,U,M,\varepsilon,\gamma_U,\gamma_M), \qquad (1)$$

где U – общее передаточное число трансформатора; M – крутящий момент на входном валу (при жесткой связи с коленчатый валом ДВС равен создаваемому эффективному крутящему моменту); ε – угловое ускорение входного вала; γ_U – скорость изменения передаточного числа в трансформаторе; γ_M – скорость изменения крутящего момента на входном валу.

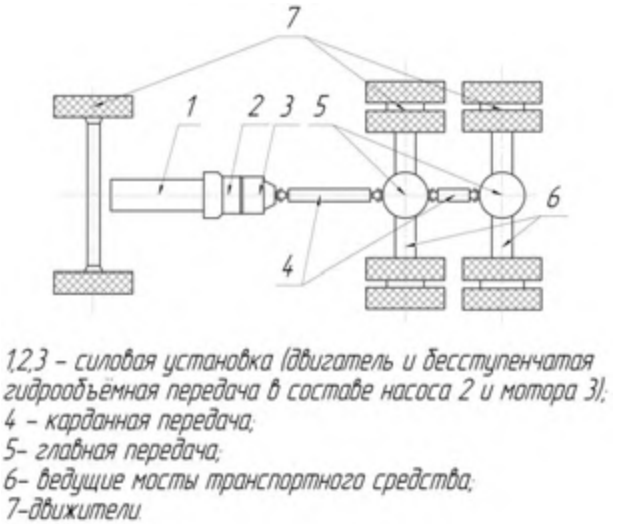


Рис. 1. Компоновка трансмиссии рассматриваемого автотранспортного средства

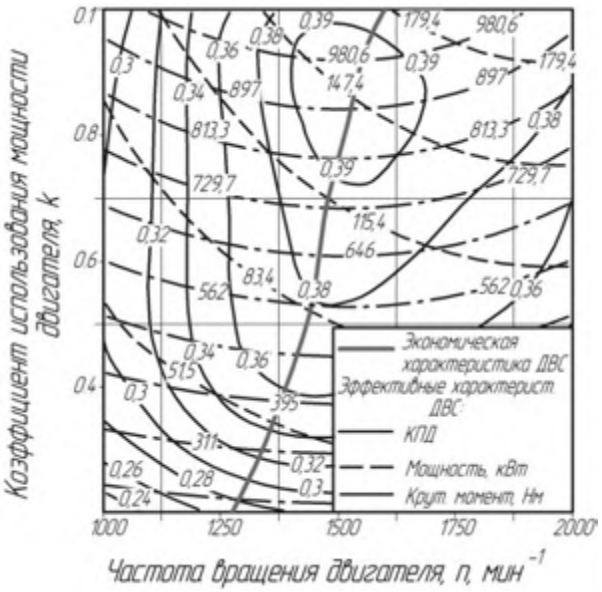


Рис. 2. Универсальная и экономическая характеристики ДВС СМД 31.15

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Таким образом, параметры ε, γ_U и γ_M являются первыми производными по времени от параметров n, U и M.

Для механической ступенчатой коробки передач, как правило, КПД для эксплуатационного диапазона режимов принимается постоянным (η_T=const), т.е. не зависящим от изменения параметров регулирования агрегата. Это позволяет заметно упростить расчеты. Для бесступенчатых трансмиссий (вариаторов) функция КПД в большей мере дифференцирована от значений параметров регулирования. При этом превалирующее влияние оказывают три независимых параметра регулирования: передаточное число, крутящий момент входного вала и его частота вращения. Это справедливо для вариаторов различных типов и конструкций – CVT [8], гидрообъемного [9] и т.д.

Рассматриваемый в настоящей статье гидравлический вариатор состоит из двух регулируемых гидравлических машин аксиального типа – насоса и мотора. КПД гидромашин и гидрообъемных передач на различных режимах принято выражать с помощью универсальных характеристик, полученных экспериментально. Универсальная характеристика гидромашины представляет собой график, построенный в координатах крутящего момента и частоты вращения вала. На графике нанесены кривые равных значений полного КПД [9]. На рис. 3 приведена универсальная характеристика насоса (рис. 4) рассматриваемой гидропередачи для угла наклона диска 6 градусов (φ=6°).

Универсальные характеристики насоса и гидромотора не отражают влияния на КПД некоторых параметров (углов наклона дисков). Таким образом, эта характеристика не выражает КПД как функцию 3-х независимых переменных (о необходимости чего было отмечено выше).

Графическое отображение КПД как функции возможно благодаря всережимной характеристике, представленной рядом универсальных характеристик.

Особенностью гидрообъемной бесступенчатой трансмиссии является наличие внутренней степени свободы, т.к. одинаковое передаточное отношение может обеспечиваться различными сочетаниями углов наклона диска насоса φ_1 и мотора φ_2.

Для компенсации данной неопределенности должна решаться задача оптимизации, параметрами для которой являются рассматриваемые углы, а критерием – максимальный полный КПД трансформатора при фиксированных значениях исходных 3-х независимых переменных, которые его определяют: передаточного числа, крутящего момента входного вала и его частоты вращения.

Для нахождения частных решений поставленной задачи применяется диаграмма, приведенная на рис. 5, которая построена для следующих значений независимых переменных: передаточное число U=1, крутящий момент входного вала M=600 Нм, частота вращения входного вала n=800 мин$^{-1}$.

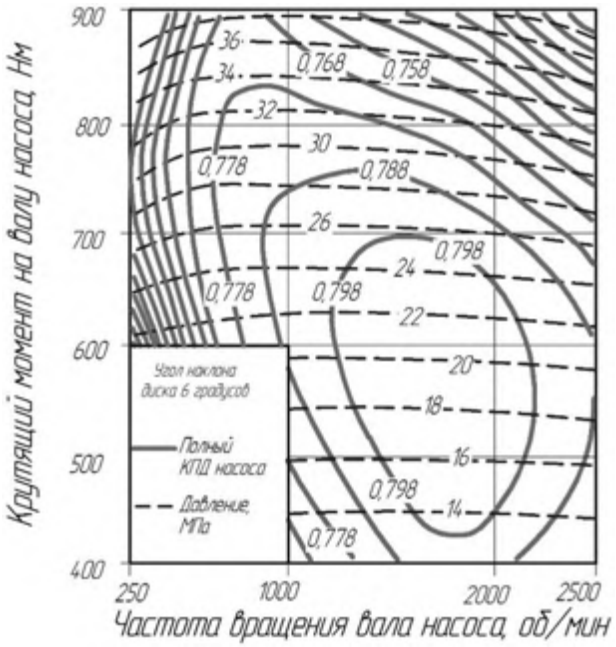


Рис. 3. Универсальная характеристика аксиального гидронасоса типоразмера S21 при наклоне диска 6°

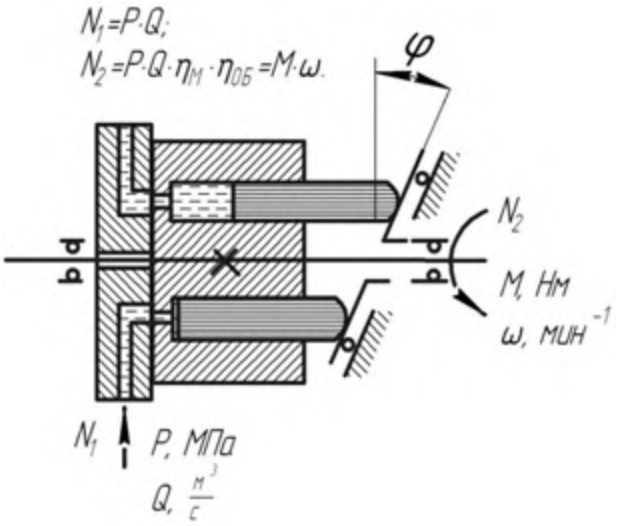


Рис. 4. Схема аксиального гидронасоса с наклонным диском

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

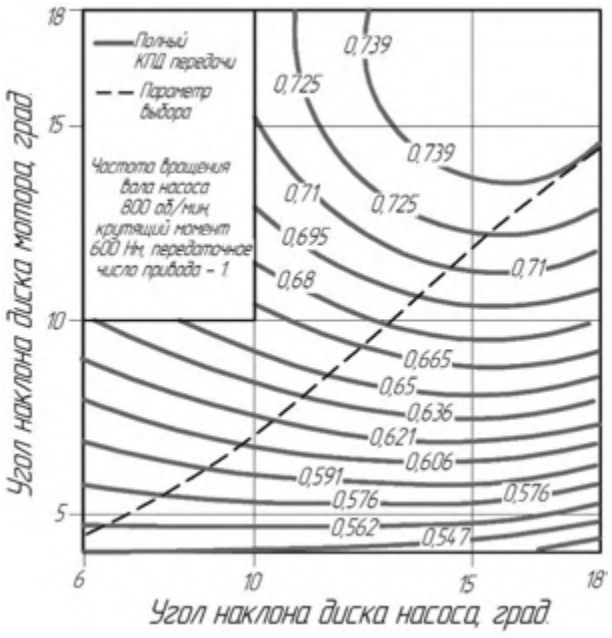


Рис. 5. Зависимость полного КПД трансформатора от углов наклона дисков насоса и мотора при фиксированных значениях переменных, его определяющих

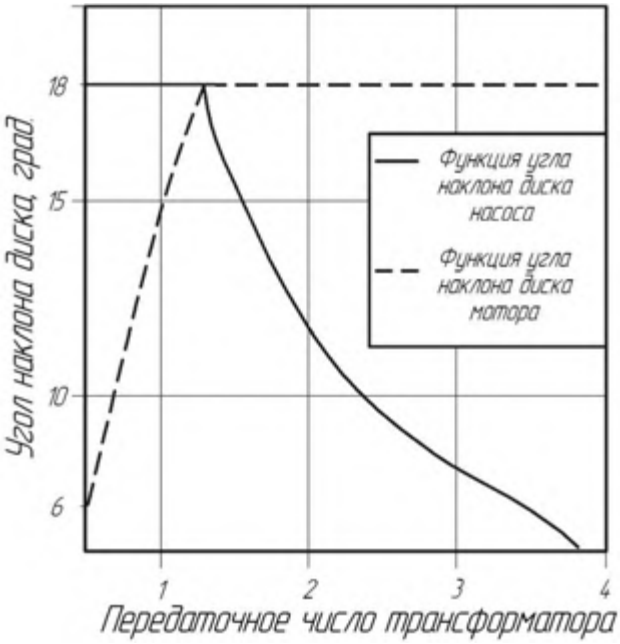


Рис. 6. Зависимость углов наклона диска насоса и мотора от передаточного числа трансформатора при максимальном КПД

Пунктирной кривой на диаграмме обозначен параметр выбора (определяемый уравнением (2) на основании равенства расходов насоса и мотора с учетом соответствующих объемных КПД), вдоль которого выполняется поиск такого сочетания углов наклона диска насоса и мотора, при котором КПД трансформатора на текущем режиме максимален.

$$-U+\frac{tg(\varphi_2)}{\eta_{oH}(n_1,P(\varphi_1),\varphi_1)\cdot\eta_{oM}(n_2,P(\varphi_1),\varphi_2)\cdot tg(\varphi_1)}=0, \quad (2)$$

где η_{oH}, η_{oM} – соответственно функции объемного КПД насоса и мотора.

На диаграмме (см. рис. 5) максимальное значение КПД обеспечивается при φ_1=18°, φ_2=14,9°. При решении множества аналогичных частных задач определяются функции углов φ_1 и φ_2, обеспечивающие максимальный КПД трансформатора: $\varphi_1=f(n,M,U)$ и $\varphi_2=f(n,M,U)$.

На рис. 6 приведена зависимость данных функций от передаточного числа, т.к. влияние частоты вращения и крутящего момента входного вала заметно (в пределах 5 %) не вызывает изменения закона расположения поверхности полного КПД передачи (см. рис. 3). Таким образом, если компенсирована дополнительная внутренняя степень свободы, то полный КПД трансформатора определяется функцией:

$$\eta_T=\eta_{OH}\cdot\eta_{MH}\cdot\eta_{OM}\cdot\eta_{MM}=f(n_1,M_1,U), \quad (3)$$

где η_{MH} и η_{MM}, η_{oM} – соответственно механический КПД насоса и гидромотора.

На рис. 7 и 8 приведена всережимная характеристика КПД трансформатора в виде диаграмм сечения параметром передаточного числа – значениями U=2 и U=3 соответственно. Таким образом, если КПД вариатора задан аналитически, то возможно рассмотреть совместные характеристики ДВС и трансформатора на различных режимах движения автомобиля, определяемые скоростью движения и мощностью на движителях.

На рис. 9 приведена диаграмма полного КПД силовой установки при скорости транспортного средства 7 м/с в координатах передаточного числа и мощности на движителях.

В качестве примера выбраны параметры автомобиля «КрАЗ 6510». На диаграмме также приведена кривая, обеспечивающая наиболее экономичный режим движения автомобиля.

Выполнены аналогичные вычисления с требуемым шагом для эксплуатационного диапазона скоростей и построена диаграмма регулирования силовой установки при обеспечении максимальной топливной экономичности транспортного средства с вариатором на различных эксплуатационных режимах (рис. 10).

Данная диаграмма содержит такие функции параметров оптимальности, которые удовлетворяют выбранному критерию.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

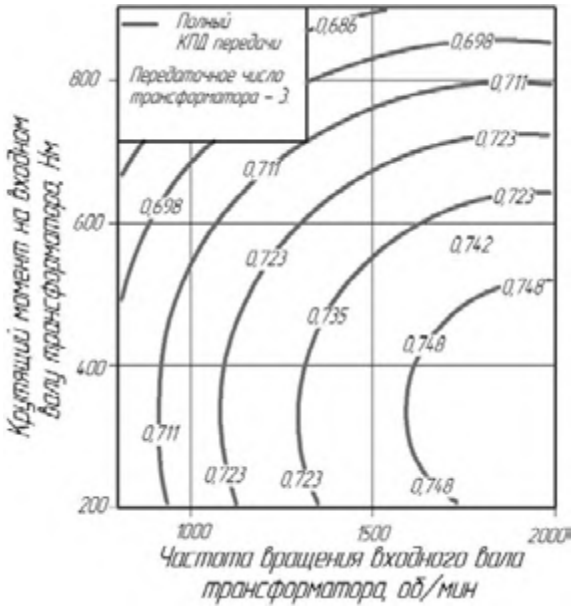


Рис. 7. Диаграмма полного КПД трансформатора для постоянного передаточного числа U=3

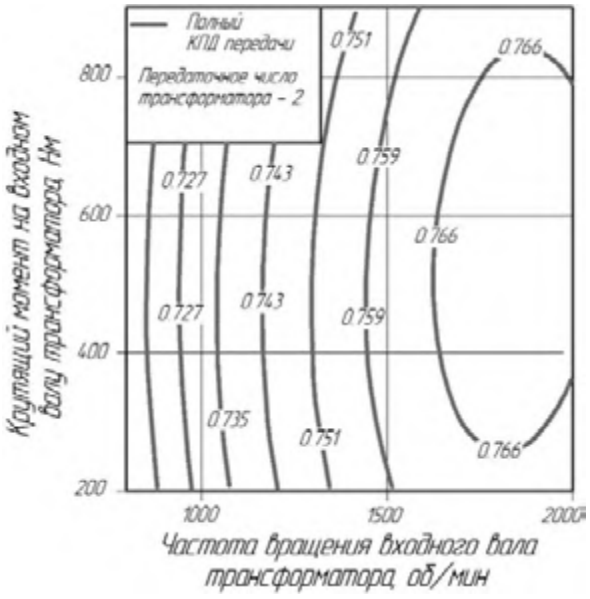


Рис. 8. Диаграмма полного КПД трансформатора для постоянного передаточного числа U=2



Рис. 9. Диаграмма полного КПД силовой установки при скорости автомобиля 7 м/с

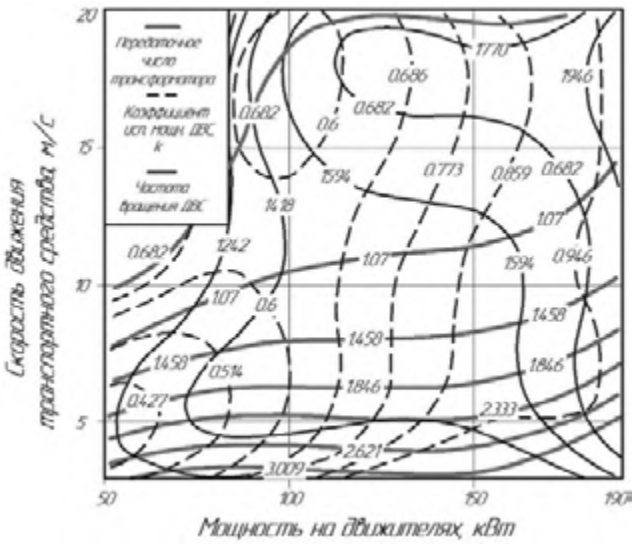


Рис. 10. Диаграмма совместного регулирования ДВС и вариатора

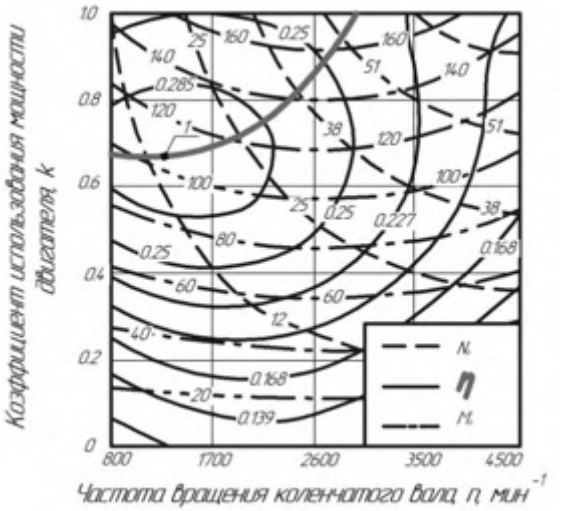


Рис. 11. Универсальная и экономическая характеристики ДВС ЗМЗ-402.10

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Также в настоящей работе приведены результаты аналогичного исследования, направленного на рациональный выбор параметров регулирования силовой установки автомобиля категории N_1, оснащенного бензиновым ДВС и механическим клиноременным вариатором типа CVT (continuously variable transmission). В качестве примера для выполнения расчетов выбраны параметры грузового автомобиля «ГАЗ 3302», оснащенного двигателем ЗМЗ-402.10 (универсальная статическая характеристика эффективных показателей приведена на рис. 11 [4]. Эскиз поперечного разреза вариатора показан на рис. 12.

Потери энергии в клиноременном вариаторе, согласно [10], определяются трением ремня о конусы ξ_{pc}, его скольжением ξ_{ck}, внутренними потерями; гидравлическими потерями при вращении деталей ξ_u; трением в подшипниках; работой насоса и т.д.:

$$\eta_T = \left(1-\xi_{ck}(M,U)\right)\cdot\left(1-\xi_{pc}\cdot(M,U)\right)\times$$
$$\times\left(1-\xi_{ck}\cdot(n,M,U)\right)\cdot\left(1-\xi_u\cdot(M,U)\right)\cdot\left(1-\xi_{cp}\cdot(M,U)\right). \quad (4)$$

В ходе расчетных исследований подтверждено, что превалирующее влияние на КПД вариатора CVT оказывают крутящий момент на входном валу M и передаточное число U. Изменение других аргументов функции (4) влияет на КПД вариатора незначительно.

На основании выполненных расчетов для упрощенного расчета КПД вариатора CVT предлагается универсальная эмпирическая функция, приведенная в относительном виде (5). Соответствующая графическая зависимость показана на рис. 13.

$$\eta_T = 0{,}896\cdot(1-\exp^{-5{,}36U}) + (0{,}0176-0{,}143\cdot U)\times$$
$$\times\frac{M}{M_{\max}} - \frac{0{,}0036\cdot U\cdot M_{\max}^2}{M^2}, \quad (5)$$

где $M_{\max}$ – максимальное значение крутящего момента на входном валу вариатора, Нм.

По аналогии с диаграммой, приведенной на рис. 10, для рассматриваемого автомобиля с вариатором CVT были рассчитаны значения функций параметров регулирования силовой установки в процессе движения автомобиля на различных режимах по критерию обеспечения максимального совместного КПД силовой установки – рис. 14.

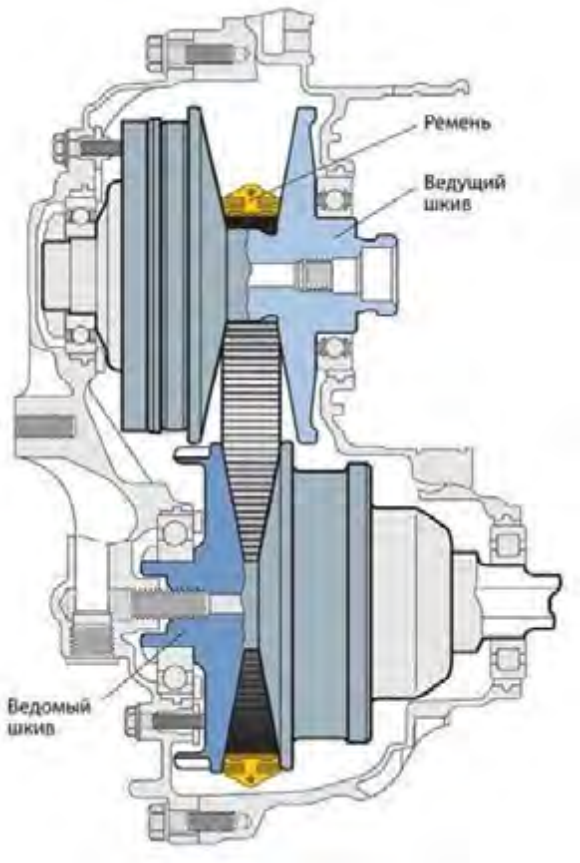


Рис. 12. Эскиз продольного разреза вариатора типа CVT

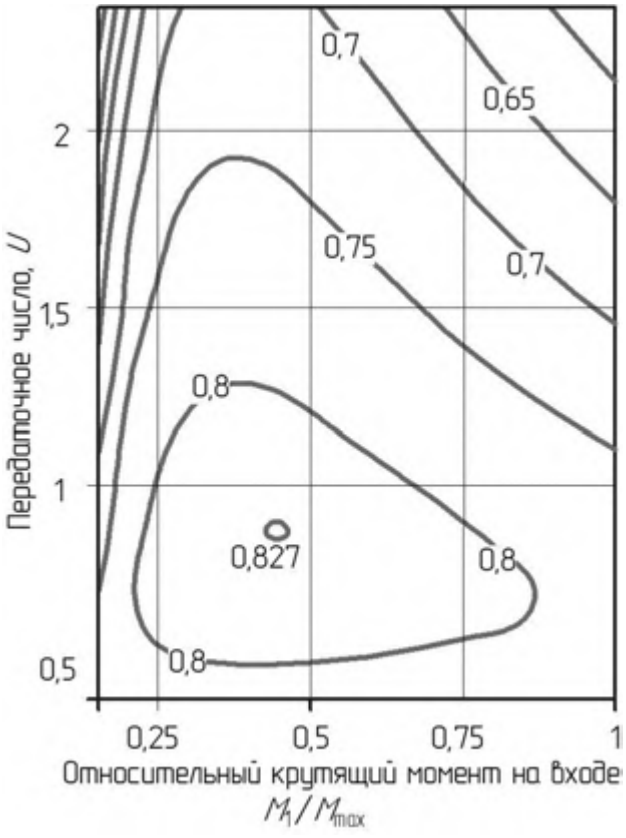


Рис. 13. Диаграмма КПД вариатора типа CVT в координатах параметров регулирования

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

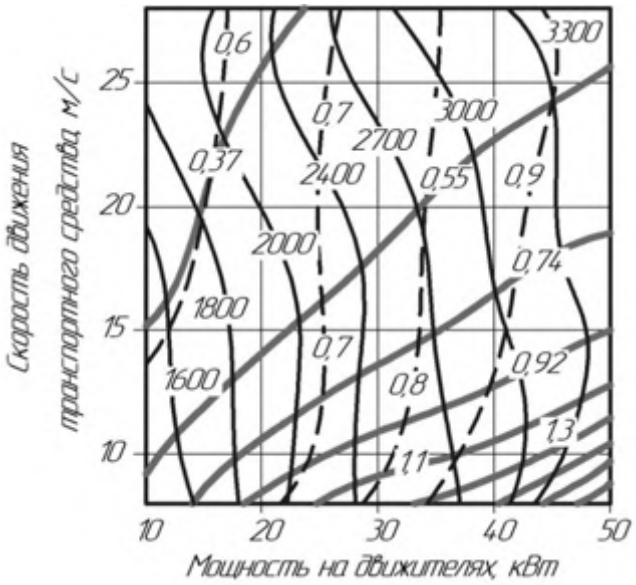


Рис. 14. Диаграмма совместного регулирования ДВС и вариатора

Результаты численного моделирования процесса движения, принятого в качестве примера автомобиля в условиях фрагмента ECE-15 Нового европейского ездового цикла (NEDC) показаны на рис. 15. При этом управление силовой установкой, которая содержит ДВС и вариатор, осуществлялось в соответствии с рис. 14.

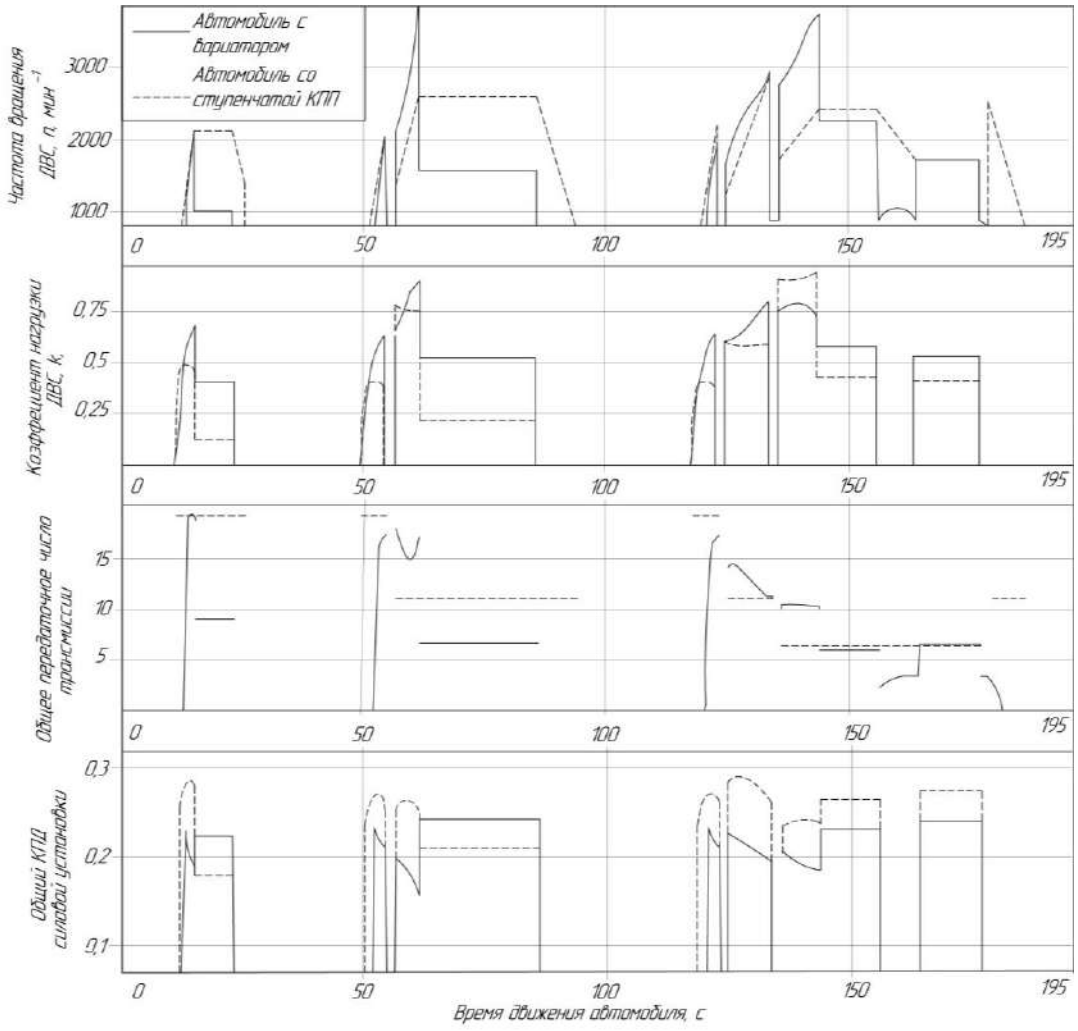


Рис. 15. Результаты численного моделирования процесса движения автомобиля «ГАЗ 3302», оснащенного различными типами трансмиссий в условиях фрагмента ECE-15

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Для варианта трансмиссии с вариатором CVT передаточное число главной передачи принималось 8,9 (вместо 5,125 для серийной ступенчатой трансмиссии). Это необходимо с целью обеспечения общего низшего и общего высшего передаточных чисел трансмиссии.

Расход топлива за ездовой цикл для серийного автомобиля составил 196 г, а для автомобиля с вариатором 197 г. Несмотря на наличие дополнительной степени свободы в сочетании параметров регулирования силовой установки, вариаторы типа CVT обладают относительно невысокой энергетической эффективностью. В качестве дополнительных мероприятий по снижению расхода топлива возможно рассматривать рациональный выбор передаточного числа согласующего редуктора (установленного между ДВС и вариатором), а также передаточных чисел дополнительных ступенчатых преобразователей.

Выводы

Результаты исследования наглядным образом демонстрируют зависимость полного КПД силовой установки от ее параметров регулирования. Рассмотренный в работе и предложенный для расчетов метод позволяет выполнить поиск оптимальных законов регулирования силовых установок, содержащих как гидрообъемные, так и механические вариаторы скорости. Решение данной задачи, в частности, обеспечивает минимальное потребление топлива при движении транспортного средства, оснащенного вариатором, в условиях принятого стандартизированного ездового цикла.

Список литературы

1. Волков, В.П. Теория эксплуатационных свойств автомобиля: учебн. пособие. – Харьков: ХНАДУ, 2003. – 292 с.
2. Ховах, М.С. Автомобильные двигатели: учеб. – 2-е изд., пер. и доп. / М.С. Ховах, Г.С. Маслов. – М.: Машиностроение, 1971. – 456 с.
3. Newman, K. Modeling the effects of transmission gear count, ratio progression, and final drive ratio on fuel economy and performance using ALPHA / K. Newman, P. Dekraker // SAE Technical Paper. – 2016; 01(1143), DOI: 10.4271/2016-01-1143.
4. Горожанкин, С.А. Исследование относительной топливной экономичности автомобиля с бесступенчатой трансмиссией / С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков // Вісник СевНТУ: збірник наукових праць. – 2011. – №122. – С. 144-148.
5. Haldeman, J.D. Automotive Engines: Theory and Servicing. – 5th ed. – London: Pearson, 2018. – 656 p.
6. Парсаданов, И.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия: монография. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 244 с.
7. Двигатели внутреннего сгорания (тепловозные дизели и газотурбинные установки) / А.Э. Симсон и др. – М.: Транспорт, 1980. – 384 с.
8. Kazemi, R. Nonlinear Optimal Control of Continuously Variable Transmission Powertrain [Электронный ресурс] / R. Kazemi, M. Raf'at, A. Reza-Noruzi // ISRN Automotive Engineering. – 2014. – Vol.2014. – 11 p. – Режим доступа: https://www.hindawi.com/journals/isrn/2014/479590/
9. Петров, В.А. Гидрообъемные трансмиссии самоходных машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 248 с.
10. Пронин, Б.А. Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи (вариаторы). – изд. 3-е, пер. и доп. / Б.А. Пронин, Г.А. Ревков. – М.: Машиностроение, 1980. – 320 с.

N.V. Savenkov /Cand. Sci. (Eng.)/, V.V. Butenko
Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (Makeevka)

RESEARCH AND OPTIMIZATION OF OPERATING MODES OF THE ENGINE WITH CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION OF THE VEHICLE

Background. *The paper considers the influence of the mode of operation of the stepless transmission (variator) of the wheeled vehicle on the overall efficiency of the power plant. The study has theoretical value – it allows evaluating the energy efficiency of the stepless transmission in conjunction with the internal combustion engine on various load-speed modes, and practical significance – the results based on experimental studies obtained on the example of automotive equipment operated in the national economy.*

Materials and/or methods. *On the basis of the developed mathematical models, a technique is proposed for the selection of the most favorable by the criterion of minimizing the adequate specific fuel*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

consumption of the internal combustion engine (at a given speed and the value of the overcome resistance) structural and operating parameters of the power plant: the frequency of the crankshaft, the corresponding gear ratio of the variator and its parameters, as well as the utilization factor of the engine power.

Results. *The parametric definition substantiated and mathematical models built of load-speed characteristics of the useful indicators of different types of fuel used in automotive engines and characteristics of relative energy losses in hydraulic and mechanical V-belt stepless transmissions. The method proposed for calculating the joint operation of these units, aimed at selecting the most favourable modes from the standpoint of fuel efficiency.*

Conclusion*. The obtained recommendations will allow creating control algorithms for power units of vehicles equipped with an internal combustion engine and a variator, as well as rational configuring of continuously variable transmissions of future vehicles of various categories following their function and required performance conditions.*

Keywords: *category N_3 vehicle, continuously variable transmission, optimization, efficiency, gear ratio.*

Сведения об авторах

Н.В. Савенков
SPIN-код: 8826-7511
ORCID iD: 0000-0003-3803-9528
Телефон: +380 (71) 370-67-51
Эл. почта: N.V.Savenkov@donnasa.ru

В.В. Бутенко
ORCID iD: 0000-0003-2155-8479
Телефон: +380 (95) 182-37-72
Эл. почта: ButenkoVV@yandex.com

Статья поступила 02.05.2019 г.
© Н.В. Савенков, В.В. Бутенко, 2019
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин



УДК 622.223.83

О.Е. Шабаев /д.т.н./, Н.Г. Афендиков /к.т.н./, А.В. Шендрик
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБСЛУЖИВАНИЙ И РЕМОНТОВ ГИДРОПРИВОДОВ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

На основе статистических данных о надежности горнопроходческих комбайнов КСП-32, полученных при их эксплуатации в шахтных условиях, разработаны математические модели прогнозирования надежности машин, которые использованы для определения рациональной периодичности технических обслуживаний и ремонтов гидроприводов комбайнов. Предложен рациональный состав работ и их необходимая периодичность по техническому обслуживанию и ремонту гидроприводов проходческих комбайнов, обеспечивающих повышение их эксплуатационной надежности.

Ключевые слова: *обслуживание, ремонт, математическая модель прогнозирования надежности, состав работ по обслуживанию комбайнов.*

Постановка проблемы

Проходка горных выработок проходческими комбайнами является более эффективным в сравнении с буровзрывным способом проходки, поскольку скорость проходки значительно выше, а себестоимость проведенных выработок намного ниже. Вместе с тем, эффективность применения проходческих комбайнов во многом определяется их фактической надежностью при эксплуатации в шахтах.

Эксплуатация проходческих комбайнов избирательного действия и исследования их надежности в шахтных условиях показали, что из трех систем комбайнов – механической, электрической и гидравлической, наименее надежной является гидравлическая система комбайна, и значительное количество простоев горной техники происходит по причине отказов элементов гидроприводов.

Решение проблемы повышения надежности проходческих комбайнов обеспечивается за счет повышения эффективности проектирования, применения современных методов и средств технологии при изготовлении, грамотной (в допустимых режимах) эксплуатации, которая обусловливается регламентными документами и инструкциями завода-изготовителя, а также своевременного технического обслуживания и ремонта машин (ТОиР).

Анализ последних исследований и публикаций

ТОиР предусматривает выполнение комплекса работ, направленных на обеспечение исправного состояния проходческого комбайна, надежной, безопасной и экономичной его эксплуатации, проводимых с определенной периодичностью и последовательностью, при оптимальных трудовых и материальных затратах [1].

Одним из основных понятий теории надежности является понятие отказа [2]. Отказ – это, как известно [1], потеря способности проходческого комбайна выполнить требуемые функции, т.е. разрушать горную породу и грузить разрушенную массу в транспортное средство. В стандарте [3] виды отказов по времени наступления и степени ожидания подразделяются на внезапные отказы и постепенные отказы. Внезапные отказы – это отказы, проявляющиеся в резком (мгновенном) изменении характеристик объектов. Постепенные отказы – это отказы, происходящие в результате медленного, постепенного ухудшения качества объекта.

Для предупреждения возникновения отказов оборудования проводились планово-предупредительные ремонты (ППР) [4], которые длительное время были основой для технического обслуживания проходческих комбайнов в целом и их гидравлических систем в частности.

Система ППР применялась при ремонте комбайнов в течение многих лет [4,5] в советское и постсоветское время и состояла из двух подсистем: технических обслуживаний и капитальных ремонтов. Технические обслуживания предполагают набор работ, которые отличаются друг от друга объемом, периодичностью проведения и перечнем обслуживаемых узлов.

Но, вместе с тем, наблюдения, проведенные

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

во время длительного периода эксплуатации проходческих комбайнов, показывают, что произошедшие отказы являются следствием эксплуатационных факторов, которые, как правило, не были учтены при проектировании машин. В этой связи работы по восстановлению работоспособности комбайнов следует проводить не только со стратегией регламентированных работ, а и в соответствии со стратегией по их текущему состоянию.

В настоящее время существует два варианта ремонтов. Первый вариант предусматривает проведение ППР, регламентируемых [6] с определенной периодичностью, которая не зависит от технического состояния гидравлических систем комбайнов. Второй вариант ремонтов предусматривает вместо ППР использовать систему технического обслуживания по фактическому техническому состоянию [7], которая является более прогрессивной. Основная идея системы технического обслуживания по фактическому состоянию заключается в том, что в процессе эксплуатации осуществляется диагностика элементов гидропривода [8]. На основе полученных данных определяется текущее техническое состояние гидроприводов, а затем на основании данных о техническом состоянии принимается решение [9] о необходимости проведения ТОиР.

Цель (задачи) исследования

Целью работы является определение рациональной периодичности ТОиР на стадии эксплуатации проходческих комбайнов, которая определяет, при прочих равных условиях, повышение их надежности.

Основной материал исследования

Этап эксплуатации проходческих комбайнов является одним из важнейших этапов их жизненного цикла. В начале своего функционирования они имеют высокую надежность, которая затем постепенно снижается. С течением времени в процессе эксплуатации системы проходческих комбайнов подвергаются воздействию различных факторов: агрессивных сред, запыленности воздуха в проходческих забоях, высоких динамических нагрузок при разрушении горных пород (в том числе и пород с твердыми включениями), низкого качества электрического питания приводных электродвигателей, недостаточного качества обслуживания и ремонта. Все перечисленное влияет на техническое состояние их узлов, и в них происходят необратимые физико-химические процессы, приводящие к отказам.

Для организации ТОиР, определяющих эффективность использования и надежность проходческих комбайнов, необходимо установить взаимосвязь между процессом эксплуатации и процессом изменения их технического состояния. Эту взаимосвязь можно описать математической моделью прогнозирования эксплуатационной надежности.

В соответствии с работами [10,11] математические модели прогнозирования эксплуатационной надежности разрабатываются либо на основе степенных зависимостей, либо на основе статистических показателей надежности. В настоящем исследовании математические модели прогнозирования надежности узлов рассматриваются на основе данных статистических показателей надежности для подсистем проходческих комбайнов, требующих восстановления, то есть без ремонта или замены вышедшего из строя элемента системы (или подсистемы) эксплуатация невозможна.

Одним из основных показателей надежности восстанавливаемых систем является вероятность безотказной работы (ВБР) $P(t)$, которая показывает, что вероятность того, что время наработки до отказа превышает величину t.

$$P(t) = \frac{N - n(t)}{N}, \qquad (1)$$

где $N=N_k \times N_э$ – число исходных объектов наблюдения; N_k – число наблюдаемых комбайнов; $N_э$ – число элементов наблюдения в каждом комбайне; $n(t)$ – число отказавших объектов за время t.

Параметры потока отказов (ППО) $\omega(t)$, характеризующие интенсивность отказов для восстанавливаемых узлов (подлежащих ремонту или замене при отказах), определяются по зависимости:

$$\omega(t) = \frac{n(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}, \qquad (2)$$

где $n(\Delta t)$ – число отказавших объектов в интервале времени $(t–0{,}5 \cdot \Delta t)/(t+0{,}5\Delta t)$.

Как отмечалось выше, гидравлическая система является наименее надежной из всех систем проходческого комбайна КСП-32, а гидравлические подсистемы перемещения исполнительного органа в плоскости забоя и подсистема погрузки (нагребающих лап) являются наименее надежными из всех подсистем гидравлической системы. На рис. 1 приведена диаграмма, которая построена по результатам наблюдений за работой комбайнов КСП-32 на восьми шахтах ПО «Макеевуголь».

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



Рис. 1. Диаграмма отказов гидравлических подсистем напора, подъема, поворота исполнительных органов и подсистем погрузки проходческих комбайнов КСП-32

Из данных, приведенных на рис. 1, следует, что наименее надежными являются подсистемы поворота исполнительных органов, отказ которых составляет 62 % всех отказов подсистем, перемещающих исполнительные органы, и отказов подсистем погрузки (нагребающих лап). Анализ расстояний, на которые перемещаются исполнительные органы комбайнов за счет гидроцилиндров в горизонтальной и вертикальной плоскости, а также при надвиге на забой во время разрушения забоя арочной формы, свидетельствует, что наиболее нагруженными являются подсистемы поворота. За один проходческий цикл они при примерно одинаковых моментах сопротивления перемещают исполнительные органы на примерно в 4 раза большие расстояния, чем подсистемы подъема, и примерно в 12 раз на большие расстояния, чем подсистемы напора.

На рис. 2 приведена гистограмма отказов подсистем поворота исполнительных органов.

Из гистограммы, приведенной на рис. 2, следует, что число отказов в первые шесть месяцев имеет высокие значения и составляет в сумме более 28 % всех отказов за все время эксплуатации. Объясняется это тем, что в первые шесть месяцев происходит приработка узлов комбайнов, приводящая к частым отказам. Затем в последующие 18 месяцев (в период нормальной эксплуатации) происходит примерно 47,5 % отказов, но на каждые шесть месяцев приходится в два раза меньше отказов (16 %).

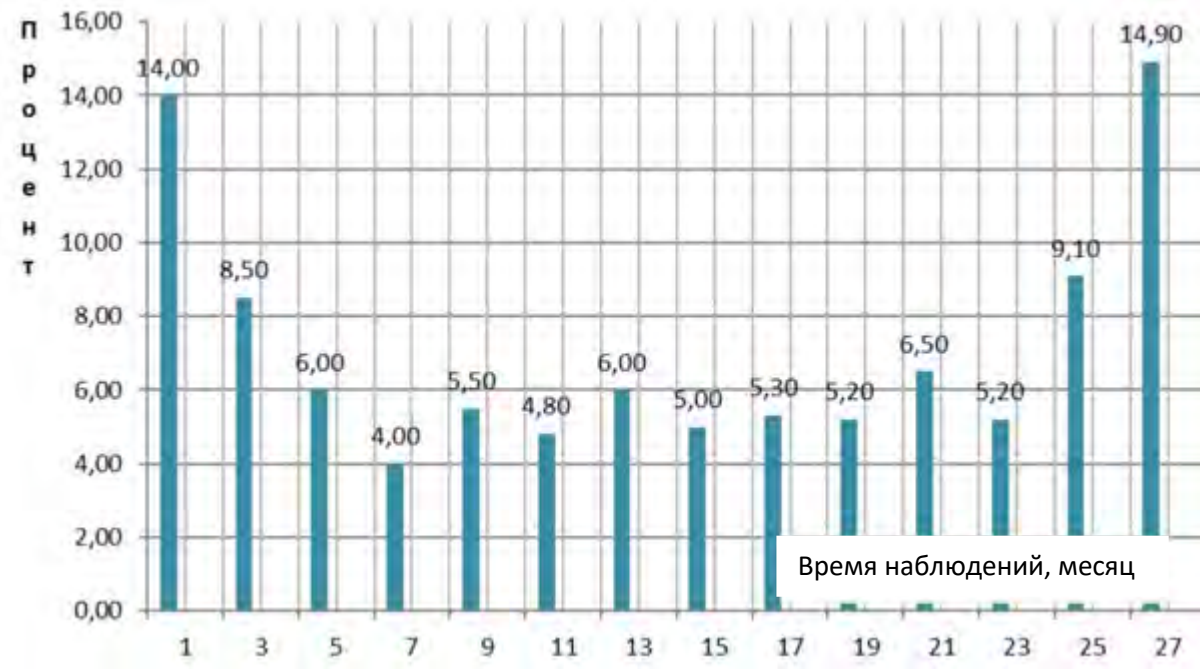


Рис. 2. Гистограмма отказов подсистемы поворота по месяцам наблюдения

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В последующие четыре месяца наблюдений за комбайнами происходит еще примерно 23 % отказов, то есть происходит возрастание интенсивности отказов, что объясняется явлениями износа и старения элементов гидравлической системы.

Определение рациональной периодичности ТОиР гидроприводов проходческих комбайнов избирательного действия включает три этапа.

На первом этапе разработана математическая модель прогнозирования эксплуатационной надежности узлов гидравлической системы, основанная на установлении ВБР, ППО и ресурса до капитального ремонта. В статье модель приводится частично (табл. 1 и выражения (3)…(5).

На рис. 3 приведены статистические графические зависимости ВБР и ППО от времени эксплуатации комбайнов, сглаженные методом скользящей медианы (функция medsmooth редактора MathCAD).

Из графика видно, что время эксплуатации (в течение 28 месяцев) подсистем поворота состоит из трех явно выраженных периодов: T_1 – периода приработки, T_2 – периода нормальной эксплуатации и T_3 – периода интенсивного износа. Период приработки (6 месяцев) характеризуется высокими показателями интенсивности отказов, которые с течением времени снижаются. Отказы в этот период вызваны недостатками производственного характера: погрешностями при механической и термической обработке, недостаточным качеством манжет и резиновых уплотнений, дефектами при сборке и монтаже и др.

Большинство погрешностей и дефектов обнаруживаются и устраняются в процессе заводских и приемочных испытаний, но часть элементов подсистем поворота остаются со скрытыми дефектами, которые проявляются и вызывают отказы в первый период эксплуатации T_1 – период приработки. Эти отказы гидравлической подсистемы поворота исполнительных органов происходят внезапно (случайно) и не имеют какой-либо определенной закономерности. Высокие показатели отказов объясняются также интенсивными режимами работы, которые характеризуются большим числом циклов работы и динамическими режимами нагрузки, формирующимися при разрушении горных пород. Период нормальной эксплуатации T_2 (6…24 месяца) согласно рис. 3 следует за периодом приработки. В этом случае имеет место наиболее низкий уровень ППО, приблизительно постоянной величины $3{,}17 \cdot 10^{-5}$ ч$^{-1}$. Функция ППО носит экспоненциальный характер. После 24 месяцев эксплуатации проходческих комбайнов наступает период износа элементов подсистемы поворота, характеризующийся значительным увеличением ППО. В течение четырех месяцев интенсивность отказов увеличивается более чем в 9 раз и достигает $28{,}6 \cdot 10^{-5}$ ч$^{-1}$. Отказы элементов поворота связаны с необратимыми процессами, связанными со старением резиновых уплотнений, износом металлических и пластмассовых деталей. Функция ППО описывается законом Вейбулла (табл. 1).



Рис. 3. Зависимость ППО и ВБР подсистем поворота исполнительных органов от времени эксплуатации комбайнов

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Функции ВБР и ППО определялись по выражениям, приведенным в работе [12]:

распределение Вейбулла:

$$P(t)=\exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}\right],\ \omega(t)=\frac{b}{a}\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}, \quad (3)$$

экспоненциальное распределение:

$$P(t)=\exp\left[-\frac{1}{a}\right];\ \omega(t)=-\frac{1}{a}, \quad (4)$$

где a – параметр масштаба, b – параметр формы.

Зависимости ВБР, приведенные в табл. 1, используются для определения долговечности подсистемы поворота.

Долговечность характеризуется средним ресурсом до капитального ремонта T_P подсистем поворота и определяется по формуле:

$$T_P=\sum_{i=1}^{n}P(t)\cdot\Delta t, \quad (5)$$

где n – количество рассматриваемых интервалов времени$\cdot\Delta t$.

На втором этапе определяется периодичность и объем ТОиР на основе результатов прогнозирования эксплуатационной надежности. Для обеспечения внедрения передовых методов технического обслуживания и ремонта проходческих комбайнов, широкого внедрения специализации ремонтных работ, а также для своевременного обеспечения ремонтных работ материалами, запчастями и комплектующими узлами необходима оценка комплексных показателей надежности проходческих комбайнов. На рис. 4 приведены функции ВБР подсистем поворота при проведении ТОиР. После времени приработки $T_{пр}$ происходит снижение ВБР до очень низкой величины 0,65. Срочно требуются ремонты, восстанавливающие ресурсы подсистем поворота (графики построены из предположения, что ресурсы после ремонта восстановлены до первоначальных значений). Затем после каждых девяти месяцев нормальной работы $T_{н1}$ и $T_{н2}$ также требуются ремонты. Следует отметить, что в период работы $T_и$ после 24 месяцев эксплуатации комбайнов целесообразно не проводить восстанавливающие ремонты подсистем поворота, а выполнять капитальные ремонты проходческих комбайнов на ремонтных заводах. Это объясняется тем, что в период износа очень резко снижается ВБР и через три месяца работы достигает низкой величины 0,8.

Третий этап включает в себя разработку технических мероприятий по повышению эксплуатационной надежности. На рис. 5 приведена блок-схема предлагаемого рационального состава работ по ТОиР гидроприводов проходческих комбайнов. Следует отметить, что проведение проверок, предусмотренных техническими обслуживаниями и текущими ремонтами, и устранение выявленных неполадок восстанавливает надежность подсистем гидравлических систем комбайнов.

Мероприятия по техническому обслуживанию включают регламентированные обслуживания, которые вытекают из опыта эксплуатации и предусмотрены в конструкторских, эксплуатационных или нормативных документах, а также включают обслуживания по техническому состоянию. Необходимо также производить предэксплуатационное техническое обслуживание при монтаже в монтажной камере, демонтаже в демонтажной камере и монтаже в новой монтажной камере на новом проходческом участке.

Регламентированные технические обслуживания следует производить ежесменно, ежесуточно, еженедельно и ежемесячно. Технические осмотры оборудования, которые выполняют для контроля его технического состояния и своевременного выявления дефектов, производятся с применением внешних средств контроля или диагностирования. Для контроля используются как встроенные в конструкции комбайнов средства измерений, так и переносные устройства, используемые для измерения герметичности, вибрации и других показателей.

Табл. 1. ВБР и ППО подсистем поворота исполнительных органов

Период эксплуатации, месяцы	Закон математической модели	Зависимость ВБР	Зависимость ППО
1…6	Вейбулла	$P_1(t)=\exp\left[-\left(\frac{t}{1327}\right)\right]^{0,95}$	$\omega(t)=\frac{0,95}{1327}\left(\frac{t}{1327}\right)^{0,95}$
6…24	Экспоненциальный	$P_2(t)=\exp[-\frac{1}{350}]$	$\omega(t)=\frac{1}{350}$
24…28	Вейбулла	$P_3(t)=\exp\left[-\left(\frac{t}{215}\right)^{1,25}\right]$	$\omega(t)=\frac{1,25}{215}\left(\frac{t}{215}\right)^{0,25}$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

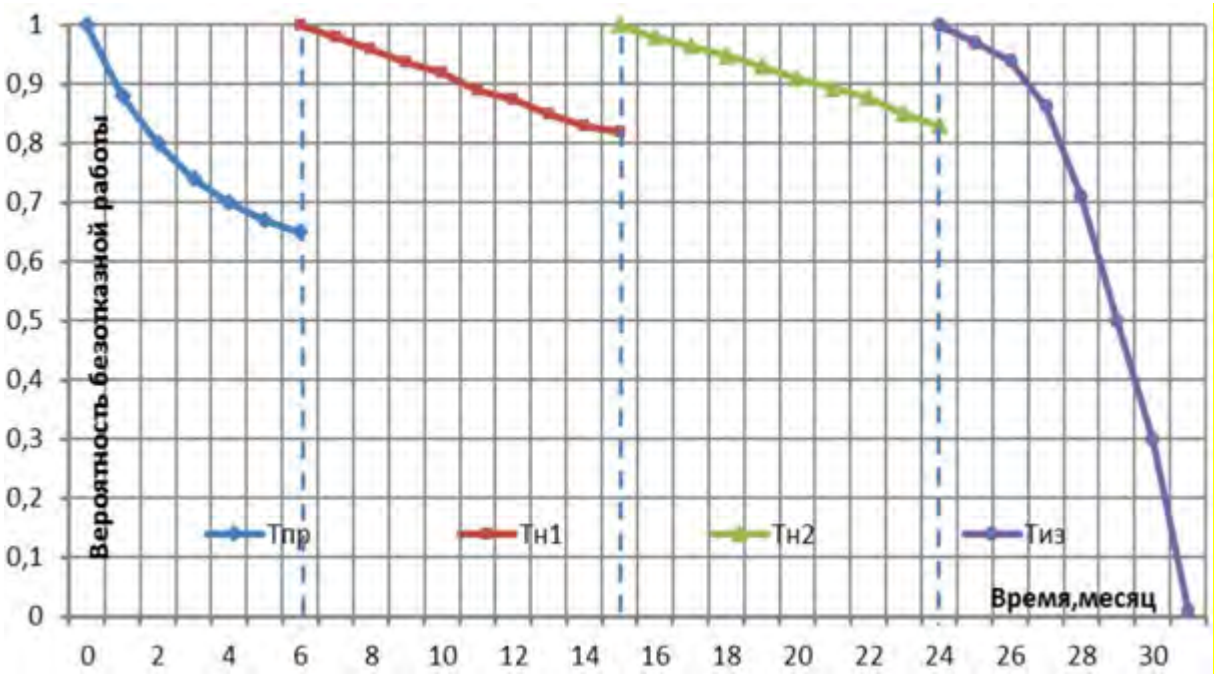


Рис. 4. Функция ВБР подсистем поворота исполнительных органов при проведении ТОиР



Рис. 5. Рациональный состав работ по техническому обслуживанию и ремонту гидроприводов проходческих комбайнов

Кроме этого, используются визуальные и измерительные контроли отдельных сборочных единиц оборудования с частичной, при необходимости, его разборкой, очистка смазочных жидкостей с помощью внешних очистительных устройств или замена смазочного материала.

Контроль исправности измерительных систем и средств измерений, наблюдения за креп-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

лениями металлических и гибких частей трубопроводов, подводящих рабочую жидкость ко всем потребителям гидравлической энергии, а также проверки на исправность подсистем гидравлической системы комбайна выполняются с остановкой работы или на работающей машине.

Кроме этого, на стадии эксплуатации комбайнов необходим контроль соблюдения режимов работы, условий и правил эксплуатации гидравлических систем, сбор и анализ информации о надежности комбайнов для выявления причин отказов, повреждений и разработки предложений по устранению этих причин. Очень важным для повышения надежности работы гидравлических приводов является необходимость обучения машинистов комбайна и слесарей-ремонтников инженерно-техническим составам шахт, особенностям конструкции машин, передовым методам их эксплуатации, ремонта и обслуживания.

Ежесменное ТО. Производится в каждой смене перед началом работы. Машинист комбайна и электрослесарь должны произвести визуально внешний осмотр всех составных частей комбайна с целью проверки их общего состояния и устранения замеченных недостатков. Также машинист обязан вести контроль работы систем и подсистем комбайна для сбора сведений об их техническом состоянии с целью планирования работ по техобслуживанию в ремонтной смене. При контрольных технических осмотрах оборудования имеется возможность устанавливать фактическое состояние деталей, сопряжений и сборочных единиц, их соответствие планируемому виду технического обслуживания и вносить возможные изменения в планы текущих ремонтов. По этой причине контрольные осмотры особенно эффективны для осуществления своевременной замены быстроизнашивающихся деталей и оценки состояния наиболее ответственных функциональных систем.

Для выполнения мелких ремонтных работ, с целью уплотнения времени на техобслуживание, необходимо использовать промежутки технологического цикла, когда можно произвести безопасное устранение неисправностей и осуществлять контроль состояния исполнительных механизмов без остановки работы комбайна.

Ежесуточное ТО. Работы производятся в каждую ремонтную смену – это, как правило, первая смена из четырех суточных рабочих смен. К этим работам относится проверка и пополнение (в случае необходимости) уровней масла в редукторах, уровня рабочей жидкости в гидравлическом баке, герметичности гидросистемы, редукторов и системы орошения, состояния отверстий сапунов гидробака и редукторов, состояния и натяжения траковых цепей гусеничного хода. Проверяется и при необходимости производится настройка давления срабатывания предохранительных клапанов гидросистем. Настройка клапанов выполняется по манометру в интервалах между включениями соответствующих гидроприводов комбайнов.

Еженедельное и ежемесячное ТО. В процессе функционирования комбайнов в конкретных условиях эксплуатации постепенно появляется информация о времени наработки, интенсивности отказов, результатах измерения контролируемых параметров, техническом обслуживании, текущих и других ремонтах. Поэтому после накопления информации можно усовершенствовать модели эксплуатационной надежности и остаточного ресурса гидравлической системы комбайнов. На каждом горнопроходческом участке устанавливается состав работ по техническому обслуживанию и периодичность (график) их выполнения для каждой системы или подсистемы проходческого комбайна с учетом требований завода-изготовителя. условий и опыта эксплуатации. Вводится система контроля над своевременным проведением и выполненным объемом работ при техническом обслуживании, оформляются журналы технического обслуживания по отдельным системам и подсистемам комбайна, в которые должны вноситься сведения о выполненных работах, сроках выполнения и исполнителях. Указанные документы должны быть проанализированы и проработаны с персоналом и находиться на рабочих местах.

Ремонты оборудования комбайнов должны быть основаны на изучении и анализе ресурса работы деталей и узлов с установлением технически и экономически обоснованных планов.

Нерегламентированные ремонты – это предаварийные ремонты и аварийные ремонты, выполняемые для восстановления работоспособности объекта при внезапных поломках оборудования, вызванных нарушением условий эксплуатации, перегрузками или другими причинами.

Специфика ремонта проходческих комбайнов определяется их технической сложностью и большим разнообразием узлов (механических, гидравлических, электрических, измерительной аппаратуры и др.), входящих в системы и подсистемы машин. Для обеспечения технического обслуживания оборудования и выполнения ремонтных работ по устранению дефектов и неисправностей оборудования, возникших в процессе эксплуатации, необходимы ремонтные бригады, которые выполняют текущие и средние ремонты. Эти ремонты, как правило, производятся в

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

подземных условиях на месте эксплуатации или в монтажных и демонтажных камерах, и выполняются силами ремонтного звена проходческой бригады, а более сложные ремонты производятся ремонтными участками электромеханических служб шахт. При этом некоторые узлы, которые невозможно отремонтировать на предприятии, передаются для ремонта на специализированные ремонтные предприятия.

После использования всего ресурса комбайна необходимо проводить капитальный ремонт в заводских условиях, который выполняется для восстановления полного (или близкого к полному) ресурса. При этом заменяются или восстанавливаются практически все его части, включая базовые детали и баки для гидравлической жидкости.

Кроме капитального ремонта проходческих комбайнов в заводских условиях осуществляются ремонты по восстановлению изношенных деталей с одновременным повышением прочности, износостойкости, коррозионной стойкости и др. на основе применения новых технологических процессов (наплавка, электромеханическая обработка поверхностей, газотермическое напыление и др.).

Шахты и производственные объединения должны иметь запасной фонд агрегатов, узлов и деталей проходческих комбайнов, необходимых для проведения ремонтов. Источниками создания обменного фонда изделий и их составных частей являются: комплекты, поставляемые вместе с оборудованием; запасные части, поставляемые заводом-изготовителем по специальным заказам; узлы и детали, восстановленные в условиях шахтных мастерских и (или) в условиях специализированных ремонтных предприятий.

Основой для разработки плана ремонта проходческого комбайна или его основных узлов является прогнозируемая средняя наработка в часах, которую можно рассматривать и как количество пройденных метров горной выработки или как объем разрушенной горной массы в период от начала до конца ремонтного цикла.

Надежность отдельных систем и подсистем комбайнов в значительной степени определяется особенностями условий эксплуатации. Выше отмечалось, что элементы и детали гидравлической системы проходческого комбайна: клапаны, поршни и плунжеры, штоки, уплотнительные манжеты и уплотнительные кольца – имеют низкий ресурс. В связи с этим ППО их резко возрастают, что приводит к необходимости выполнения значительного объема неплановых технических ремонтов (ТР).

Для предотвращения отказов, а следовательно, и уменьшения объема неплановых ремонтов для замен узлов и деталей необходимо выполнение в пределах системы ТО контрольных осмотров с выявлением по внешним признакам повреждений и отказов деталей (сборочных единиц). Это позволяет поддерживать определенный уровень надежности оборудования путем своевременного предупреждения и устранения отказов.

Исходя из вышесказанного, работы, проводимые по результатам контрольных технических осмотров, могут быть подразделены на две группы. В рамках проведения ТО: регулировочные работы (например, регулировка предохранительных клапанов) или устранение возникших повреждений (затяжка соединений и др.). В рамках проведения ТР предусмотрены замены вследствие отказа отдельных деталей (например, уплотнительных манжет) или сборочных единиц (например, в гидроагрегате).

Известно, что затраты на предэксплуатационное обслуживание зависят от периодичности демонтажных работ на пройденном проходческом участке и монтажных работ на новом участке. При небольшом периоде между монтажами вероятность нахождения проходческих комбайнов на момент осмотра в работоспособном состоянии будет высокой и излишнее предэксплуатационное ТОиР только увеличит затраты, обусловленные простоями проходческого участка. Поэтому при прохождении небольших по протяженности выработок между монтажами ТОиР целесообразно проводить с определенной периодичностью, а не при каждом демонтаже-монтаже.

Выводы

Разработана математическая модель прогнозирования эксплуатационной надежности узлов гидравлической системы, основанная на установлении вероятности безотказной работы, параметров потока отказов и ресурсов до капитальных ремонтов.

Определено, что зависимости параметров потока отказов подсистем поворота исполнительных органов комбайнов состоят из трех явно выраженных периодов: периода приработки T_1=6 месяцев, периода нормальной эксплуатации T_2=18 месяцев и периода интенсивного износа T_3=6 месяцев.

Установлено, что математическая модель вероятности безотказной работы гидравлической подсистемы поворота исполнительных органов на участке приработки описывается законом распределения Вейбулла, на участке нормальной эксплуатации – экспоненциальным законом рас-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

пределения, на участке износа – законом Вейбулла.

Для обеспечения внедрения передовых методов технического обслуживания и ремонта проходческих комбайнов на основе результатов прогнозирования эксплуатационной надежности определена рациональная периодичность и объем ТОиР.

Предложены технические мероприятия по повышению эксплуатационной надежности гидроприводов проходческих комбайнов, которые включают рациональный состав и периодичность работ по техническому обслуживанию и ремонту.

Список литературы

1. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта. Термины и определения. Межгосударственный стандарт. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://meganorm.ru
2. Половко, А.М. Основы теории надѐжности. Практикум: Учебник для вузов / А.М. Половко, С.В. Гуров. – М.: BHV, 2006. – 506 с.
3. ГОСТ Р 53480-2009 Надежность в технике. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.norn-load.ru
4. Положение о планово-предупредительной системе технического обслуживания и ремонта оборудования угольных и сланцевых шахт Министерства угольной промышленности СССР. – М.: Минуглепром, 1981. – 31 с.
5. Положение о ППР оборудования и транспортных средств на предприятиях Министерства цветной металлургии. – М.: Недра, 1984. – 176 с.
6. Руководство по эксплуатации комбайна КСП-32. – Ясиноватский машиностроительный завод, 2017. – 198 с.
7. Хорешок, А.А. Характеристика методов технического обслуживания горно-транспортного оборудования / А.А. Хорешок, А.В. Кудреватых, В.В. Кузнецов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №5. – С. 48-61.
8. Ящура, А.И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: справочник. – М.: ЭНАС, 2012. – 360 с.
9. Potts, A. Dust storm // World Mining Equip. – 1998. – №7. – P. 42-44.
10. Carlson, G. Maintenance is key factor in Runker success story // Concrete products. – 1986. – No.4. Vol.89. – P.20-23.
11. Пасюк, М.А. Математическая модель надежности узлов оборудования для определения оптимального межремонтного интервала // Известия вузов СНГ. – 2009. – №1. – С. 60-65.
12. Ефремов, Л.В. Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий. – Санкт-Петербург: Наука, 2008. – 221 с.

O.E. Shabaev /Dr. Sci. (Eng.)/, N.G. Afendikov /Cand. Sci. (Eng.)/, A.V. Shendrik
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE DETERMINATION OF RATIONAL SERVICE AND REPAIR FREQUENCY OF HYDRAULIC DRIVES OF SELECTIVE ACTION ROADHEADERS

Background. *The solution to the problem of improving the reliability of roadheaders is provided by timely and high-quality maintenance and repair. The relevance of maintenance and repair is that the material costs of repairs of the hydraulic system due to failures are very significant.*

Materials and/or methods. *Based on statistical data obtained during the operation of roadheaders, a mathematical model developed of forecasting reliability, based on the establishment of failure-free operation probability (FFOP), flow failures parameters (FFP) and resources to major repairs. The distributions of FP and FFP are described by the logarithmic law and the Weibull law.*

Results. *The rational periodicity and volume of maintenance and repair based on the results of operational reliability forecasting are determined. It was found that after the time of running-in T_{ri}, the decrease in the FFOP to a meagre value of 0.65 occurs. Repairs are urgently needed. Then, after every nine months of normal operation, T_{n1} and $T_{n2,}$ repairs also required. In the period of wear T_i, after 24 months of operation of headers, it is expedient to carry out capital repairs at repair plants since during the period of wear, the probability of failure-free operation decreases very sharply and after three months of work after the restoring repair reaches a low value of 0.8. The proposed maintenance activities include not only regular service (every shift, daily, weekly and monthly) but service on a technical condition.*

Conclusion. *The results of studies to improve the reliability of the elements of hydraulic systems due*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

to high-quality and timely maintenance and repair allowed developing measures to improve the control, maintenance, repair and of documentation on the accounting work before failures, the recovery time after failures, as well as the cost of labor and material resources for repairs of hydraulic drives.

Keywords: *service, repair, mathematical reliability prediction model, roadheaders maintenance.*

Сведения об авторах

О.Е. Шабаев
SPIN-код: 1447-2343
ORCID iD: 0000-0002-0845-7449
Телефон: +380 (95) 429-13-32,
+380 (71) 346-16-70
Эл. почта: oeshabaev@yandex

А.В. Шендрик
Телефон: +380 (50) 472-60-05,
+380 (71) 311-09-88
Эл. почта: gormash@i.ua

Н.Г. Афендиков
ORCID iD: 0000-0001-8876-7254
Телефон: +380 (50) 628-23-60,
+380 (71) 376-13-46
Эл. почта: an77tn@gmail.com

Статья поступила 28.05.2019 г.
© О.Е. Шабаев, Н.Г. Афендиков, А.В. Шендрик, 2019
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко



УДК 621.316.9

И.А. Бершадский /д.т.н./, А.В. Згарбул, А.А. Кулиш
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 220 В ОТ ПЕРЕГРУЗОК С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА ЭЛЕКТРОПРОВОДКИ

На основании применения метода конечных элементов определена зависимость времени нагрева двухжильного кабеля при протекании электрического тока. Дано сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными. Разработан метод, позволяющий установить прогнозируемое время допустимой перегрузки кабеля, и предложен способ, реализующий микропроцессорное устройство тепловой защиты электропроводки напряжением 220 В.

Ключевые слова: *электропроводка, нагрев, перегрузка, тепловая защита, микропроцессорное устройство.*

Постановка проблемы

Для обеспечения безопасности жилых и общественных зданий большое значение имеет предотвращение пожароопасного перегрева, возникающего при перегрузках и удаленных коротких замыканиях с малыми кратностями тока K по отношению к длительно допустимому току электропровода (кабеля).

Перегрев изоляции проводников выше предельно допустимой температуры приводит к развитию пожароопасной ситуации и дальнейшему короткому замыканию (КЗ).

Наиболее распространенными аппаратами защиты в настоящее время являются автоматические выключатели (АВ) различных производителей (ABB, IEK и др.), которые почти повсеместно вытесняют плавкие предохранители и автоматические пробки.

Их главный недостаток состоит в несоответствии координации время-токовых характеристик (ВТХ) аппарата защиты и кабельно-проводникового изделия.

Поэтому актуальной является задача разработки научно обоснованного метода и, впоследствии, способа его реализации для установления путем моделирования или обработки экспериментальных зависимостей нестационарного нагрева провода (кабеля) прогнозируемого времени допустимой перегрузки t_{off}. То есть необходимо обеспечить соответствующую координацию ВТХ аппарата защиты и кабельно-проводникового изделия.

Анализ последних исследований и публикаций

Известный способ защиты электроустановок сетей жилых, административных и коммерческих зданий основан на нагреве электрическим током биметаллической пластины, встроенной в АВ. Отключение защищаемого участка сети происходит при превышении изгиба пластины и механическом воздействии на расцепитель АВ [1].

Это достаточно простое по конструкции и широко применяемое устройство имеет следующие недостатки:

– требуется индивидуальный расчет, выбор и настройка измерительного органа под характеристики каждого присоединения сети, что при отсутствии интеллектуализации представляется сложной задачей;

– неучитываемое влияние внешних факторов на изгиб биметаллической пластины приводит к наличию значительной зоны разброса характеристик срабатывания АВ по времени при одном и том же токе;

– при кратностях тока K=1,20...1,45 возможны дополнительный недопустимый перегрев провода сети и уменьшение его срока службы, т.к. стандартные АВ, как правило, в таком режиме работы сети нечувствительны.

Анализ возможностей микропроцессорных устройств защиты показывает целесообразность разработки новых принципов обеспечения пожаробезопасности кабелей и электропроводок сетей напряжением 220/380 В, которые позволили бы ускорить отключение аварийного участка, снизить вероятность перегрева, плавления изоляции и дальнейшего КЗ.

Известен способ максимальной токовой защиты (МТЗ) с избирательной чувствительностью к токам удаленных КЗ и пусковым токам асинхронных двигателей АД [2], однако он не может использоваться в режимах перегрузки электрическим током, поскольку не учитывает нагрев проводов сети в зависимости от их пара-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

метров. Попытка решить аналогичную задачу применительно к интеллектуальной защите двигателей предпринималась в [3], и в работах [4,5] где использовалась тепловая модель нагрева-охлаждения, а также время-токовая защитная характеристика. Анализ такой защиты показал, что требуется его дальнейшая разработка и переориентация на электрораспределения в сетях с проводами наиболее распространенных типов (ПВС, ШВВП, АППВ, АВВГ, ВВГ, ВВГнг и т. п.), имеющими резиновую или поливинилхлоридную изоляцию сечением 1,5…6 мм^2.

Цель (задачи) исследования

Целью работы является обоснование способа защиты участка электрической сети от пожароопасных перегрузок, в котором за счет оптимизации контроля защитных время-токовых характеристик и динамики теплового режима провода обеспечивается возможность своевременного отключения этого участка, предотвращения повреждения провода и увеличения срока эксплуатации.

Основной материал исследования

Статистические данные России, Украины и многих других стран, показывают, что среди электротехнических изделий первое место по пожарной опасности занимают кабели и провода – 69,6 % (рис. 1).

Для того чтобы получить тепловую модель нагрева-охлаждения провода (кабеля) электрической сети, необходимо знать время достижения его изоляцией предельно допустимой температуры нагрева. Согласно [3] предупреждающий сигнал Warning подается микропроцессорным устройством тепловой защиты (МТПЗ), если текущее превышение температуры проводника над температурой окружающей среды $\tau>1{,}1\cdot\tau_{class}$, а сигнал на отключение Danger – при $\tau>1{,}4\cdot\tau_{class}$, где τ_{class} – допустимое превышение температуры для соответствующего класса изоляции. Для изоляции из ПВХ-пластика нагревостойкого τ_{class}=70 °С – $\Theta_{o.c.}$, а для ПВХ-пластика не нагревостойкого τ_{class}=60 °С – $\Theta_{o.c.}$, где $\Theta_{o.c.}$ – температура окружающей среды.

Нагрев и охлаждение провода (кабеля) является сложным динамическим процессом, который зависит от многих факторов, полный учет которых невозможен. Как показали результаты дальнейшего математического моделирования, в средах Elcut 6.3 и ComsolMultiphysics 5.3a при кратностях тока $K_i\leq2$ могут с достаточной для практики точностью выполняться следующие допущения:

– температура $\Theta_{o.c.}$ неизменна в течение всего неустановившегося режима;

– плотность: материала проводника $\rho_м$=8900 кг/м^3, изоляции $\rho_{из}$=1400 кг/м^3, воздуха $\rho_в$=1,23 кг/м^3; удельная теплоемкость: проводника $C_м$=400 Дж/(кг·К), изоляции $C_{кз}$=1600 Дж/(кг·К), воздуха $C_в$=1000 Дж/(кг·К); теплопроводность: проводника $\lambda_в$= 400 Вт/(м·К), изоляции $\lambda_{из}$=0,15 Вт/(м·К), воздуха $\lambda_в$=0,026 Вт/(м·К) – не зависят от времени и температуры тела.

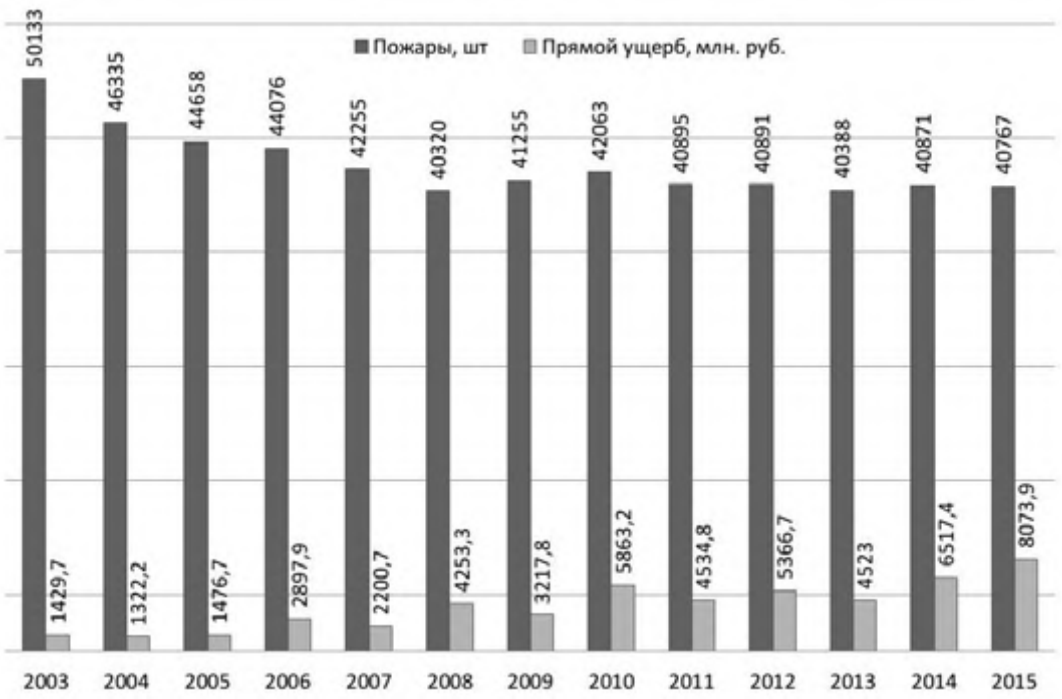


Рис. 1. Статистические данные по пожарам от электрических изделий в России 2003…2015 гг.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Электрическое сопротивление проводника зависит от текущей температуры Θ:

$$\rho(\Theta)=\rho(\Theta_{o.c.})[1+0{,}0043(\Theta-\Theta_{o.c.})], \quad (1)$$

где $\rho(\Theta_{o.c.})=1{,}72\cdot10^{-8}$ Ом·м.

Расчетная зависимость коэффициента теплообмена α характеризуются плотностью теплового потока с поверхности провода (кабеля) в воздух при открытом способе прокладки. Коэффициент теплообмена α обусловлен свободной конвекцией и зависит от перепада температур провода (кабеля) и воздуха, а также размера поверхности охлаждения b:

$$S=\alpha(\Theta_{н}(b)-\Theta_{o.c.}), \quad (2)$$

где b – размер большой полуоси горизонтально расположенного эллипса.

Математическое моделирование динамики нагрева двухжильного кабеля приведено на примере кабеля ВВГ 2х2,5, сечение которого показано на рис. 2. Его размеры: диаметр медной жилы $2R_w$=1,9 мм, толщина изоляции $\Delta R_{и}$=0,8 мм, толщина оболочки $\Delta R_{об}$=1,4 мм, размер большой полуоси эллипса b=4,9 мм.

Согласно [6] число Нуссельта в ламинарном и переходном к турбулентному режимах свободной конвекции:

$$Nu=0{,}494\cdot Gr^{1/4}; \quad (3)$$

$$Gr=\frac{g\cdot b^3\cdot\beta\cdot(\Theta_c-\Theta_{o.c.})}{\nu^2}, \quad (4)$$

где Gr – число Грасгофа; g – ускорение свободного падения, м/с^2; b – большая полуось эллипса, м; Θ_c – температура поверхности кабеля, К (°С); $\Theta_{o.c.}$ – температура окружающей среды, К (°С); ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, $\nu=15{,}06\cdot10^{-6}$ м^2/с; β – температурный коэффициент объемного расширения $\beta=(273+T_0)^{-1}$.

Тогда по [7] коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha=\frac{Nu\cdot\lambda}{b}. \quad (5)$$

Аппроксимация коэффициента теплоотдачи $\tilde{\alpha}$, Вт/м^2·К (рис. 3) проводилась в диапазоне температур $\Delta\Theta=\Theta_c-\Theta_{o.c.}\leq300$ °С выражением:

$$\tilde{\alpha}=F(\Theta)=3{,}713\cdot\ln(\Theta-293{,}989)+0{,}12. \quad (6)$$

Рассмотрим пример выполнения моделирования в среде ComsolMultiphysics 5.3a для кабеля ВВГ 2×2,5. На рис. 4 представлены скриншоты программы с установленными параметрами материалов кабеля.

Результат расчетов по нагреву двухжильного кабеля ВВГ 2×2,5 показан на рис. 5, а динамика изменения во времени температуры жилы на границе с изоляцией – на рис. 7.

Экспериментальные измерения нагрева жилы кабеля проводились с помощью стенда, принципиальная схема которого представлена на рис. 6. Приборы, используемые в схеме, следующие: автотрансформатор АТСК 25, силовой понижающий трансформатор ТС-10, мультиметр FLUKE 8846A, мультиметр APPA 109N с термопарой.

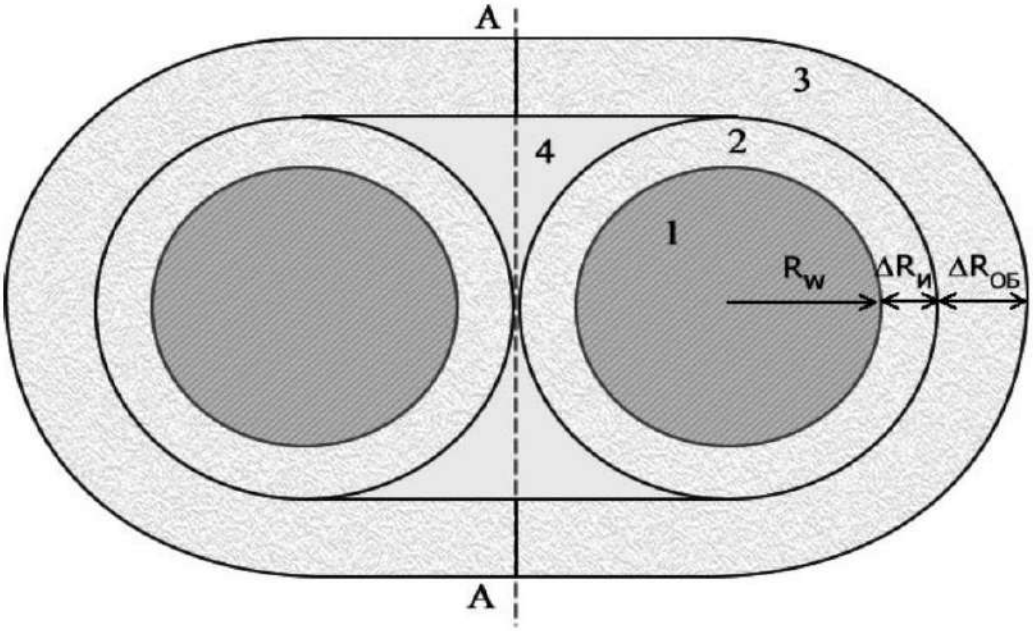


Рис. 2. Сечение кабеля ВВГ 2×2,5

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

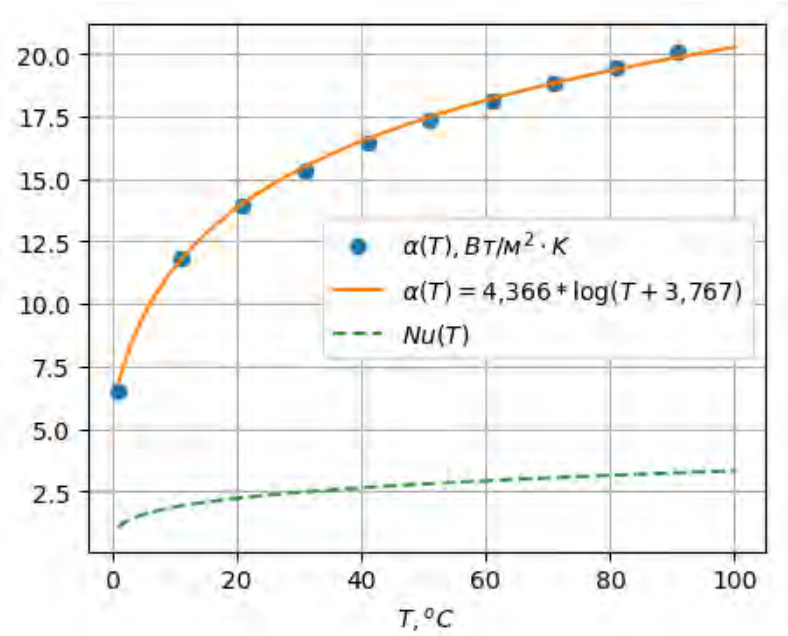


Рис. 3. Число Нуссельта и коэффициент теплоотдачи кабеля ВВГ 2×2,5

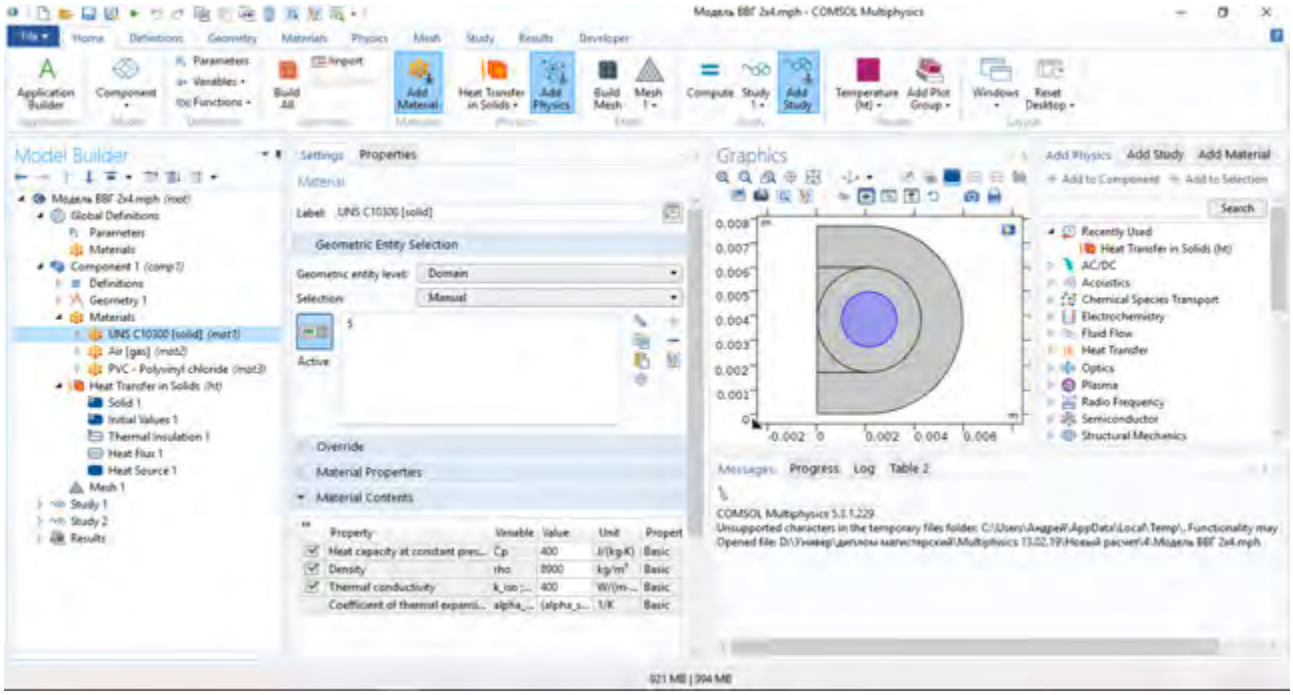


Рис. 4. Окно программы ComsolMultiphysics. Свойства меди

Экспериментальные измерения нагрева жилы кабеля проводились с помощью стенда, принципиальная схема которого представлена на рис. 6. Приборы, используемые в схеме, следующие: автотрансформатор АТСК 25, силовой понижающий трансформатор ТС-10, мультиметр FLUKE 8846A, мультиметр АРРА 109N с термопарой.

Результаты численного моделирования процесса нагрева двухжильных кабелей ВВГ 2×2,5 при кратностях тока K_i по отношению к длительно допустимому $I_{доп}$=27А: K_i=0,5; 1; 1,5; 2 – показаны на рис. 7а (расчетные данные), при K_i=2; 3; 4; 5 – на рис. 7б (данные эксперимента).

Среднее значение температуры нагрева жилы кабеля ВВГ 2×2,5 по трем рядам измерений сравнивались с численным моделированием в аналогичных условиях. Следует подчеркнуть, что здесь наблюдается сходимость ± 6 % при K_i<2.

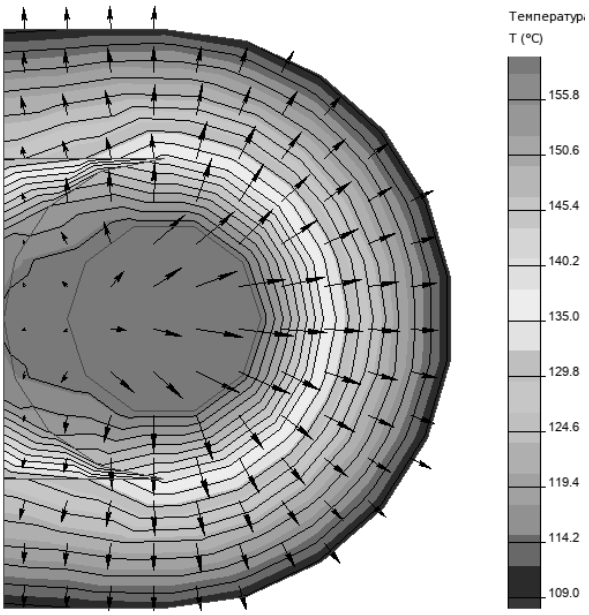
При сопоставлении экспериментальных данных нагрева жилы кабеля с результатами численного моделирования для K_i=3; 4; 5 наблюдается более значительное расхождение, поэтому при разработке алгоритма микропроцессорной тепловой защиты электрической сети 220/380 В (МПТЗ) в настоящее время взяты результаты

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

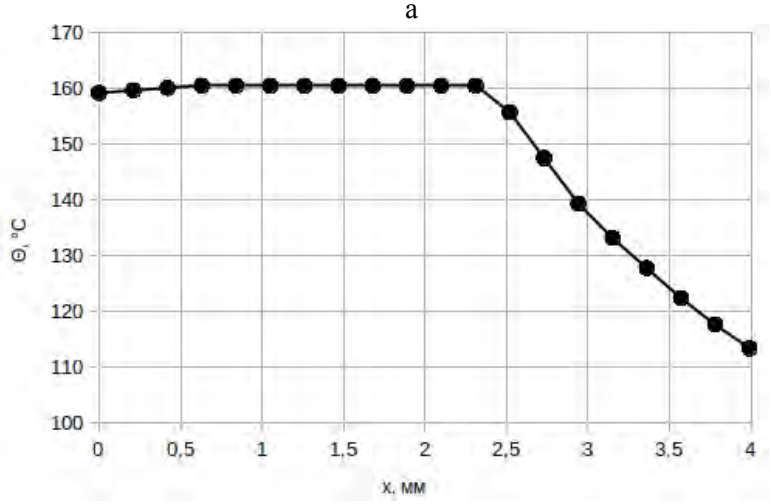
экспериментальных измерений (рис. 7б).

Принципиальная схема устройства, реализующего разработанный способ защиты электрической сети от перегрузок, поясняется на рис. 8.

При инициализации МПТЗ задается исходная информация, которая настраивается в зависимости от типоразмера и условий прокладки провода (кабеля) (табл. 1).



а



б

Рис. 5. Результаты моделирования нагрева провода в программе Elcut 6.3 при токе I= 54А и температуре воздуха $\Theta_{o.c.}$=20 °С:
а – изолинии температуры; *б* – изменение температуры вдоль координаты *x*

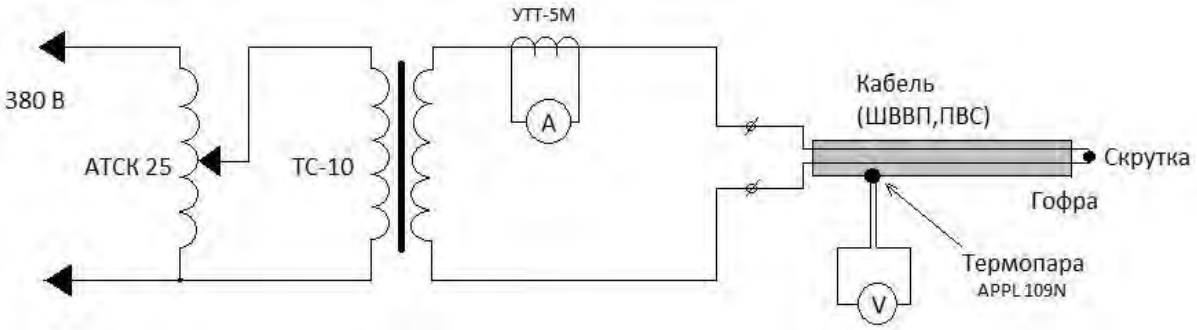
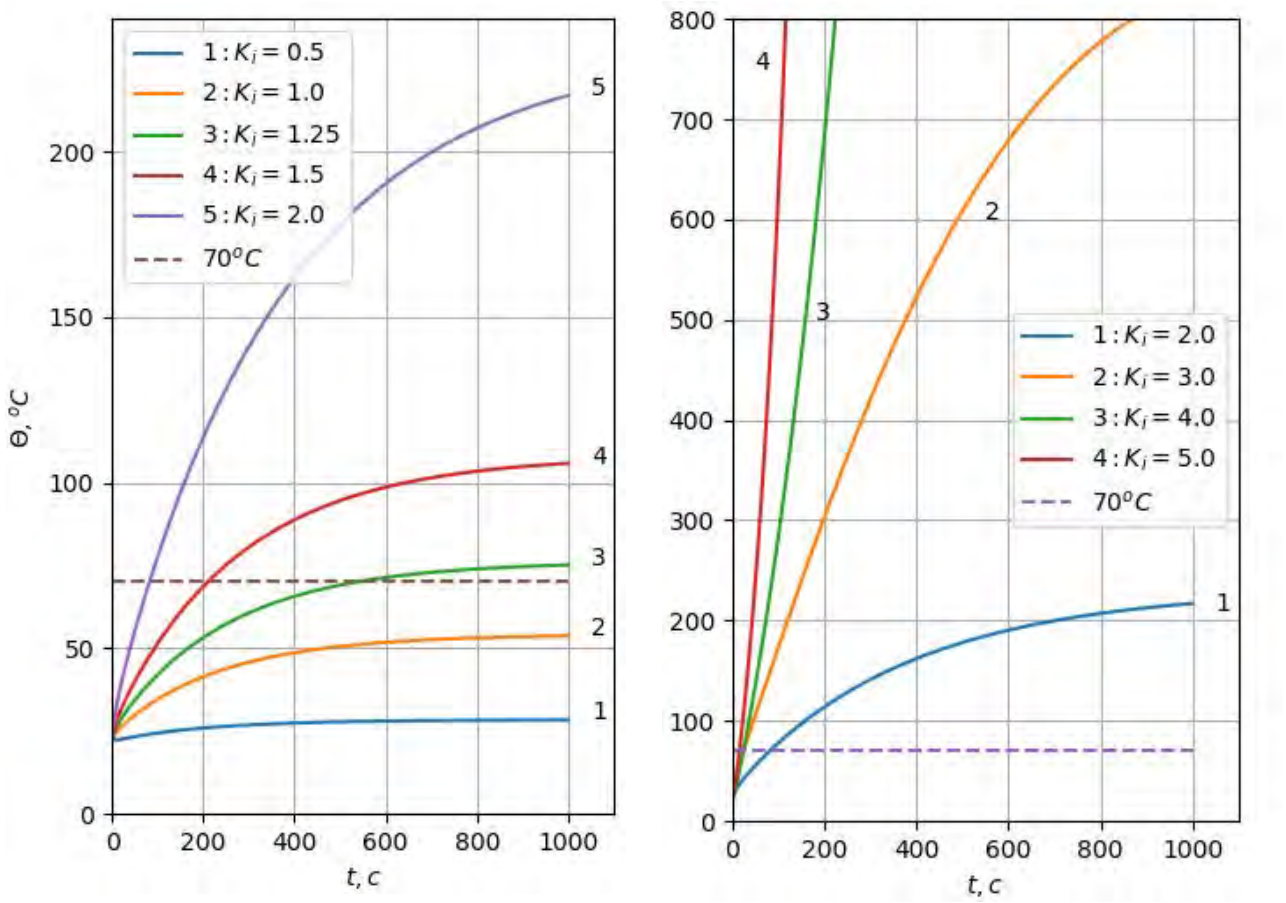


Рис. 6. Принципиальная схема экспериментального стенда для определения интервалов времени до плавления ПВХ-изоляции кабельных изделий

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 7. Зависимости температуры поверхности кабеля от кратности тока перегрузки: *а* – согласно расчету; *б* – согласно эксперименту

Табл. 1. Типоразмер и условия прокладки провода (кабеля)

Типоразмер	Материал защищаемого провода / сечение, мм^2	Уставка МПТЗ, А		
		n=1	n=2	n=3
I	Медь/1,5	23	18	15
II	Медь/2,5	30	25	21
III	Медь/4	41	32	27
I	Алюминий/2,5	24	19	16
II	Алюминий/4	32	25	21
III	Алюминий/6	39	31	26

В табл. 1: n=1 – открытая прокладка, n=2 – 2-жильный провод в трубе; n=3 – 3-жильный провод в трубе; $\Theta_{o.c.}$ – температура окружающей среды, соответствующая характеристикам нагрева провода из холодного состояния; Θ_{off}=70 °С – максимально допустимая температура нагрева провода данного класса изоляции *E;* из чего следует, что максимально допустимая температура перегрева провода $\tau_{off}=\Theta_{off}-\Theta_{o.c.}=70-\Theta_{o.c.}$, °С.

В каждом из проводов, подключенных к аппарату защиты 1-фазной электрической сети (фазном и нейтральном), или только в фазном проводе выполняют измерение токов (рис. 8, датчик тока U2) и их аналогово-цифровое преобразование в дискретные значения $i_{ph.j}$ (микроконроллер U1, порт PA1), затем определяют действующие значения тока I_{ph} методом интегрирования квадратов дискретных значений $i^2_{ph.j}$ и определяют коэффициент, равный отношению значения тока I_{ph} и тока уставки тепловой защиты $I_{\Theta i}$ как $K_i=I_{ph}/I_{\Theta i}$.

Измерение $i(t)$ производят в течение 3-х периодов промышленной частоты $3T$=60 мс, при этом за один период T_1=20 мс может выполняться до 10-ти измерений с интервалом 2 мс.

В табл. 1 представлены допустимые значения токов проводов с алюминиевой и медной жилами сечением 1,5...6 мм^2 для различных условий прокладки $I_{\Theta 1}$, $I_{\Theta 2}$, $I_{\Theta 3}$.

По предложенным зависимостям находят установившийся перегрев провода $\tau_{уст}$, °С, и постоянную времени нагрева (охлаждения) T_1 в зависимости от K_i.

Затем определяют текущий перегрев провода:

$$\tau_{i+1} = \tau_{уст} - \left(\tau_{уст} - \tau_i\right) \cdot \exp\left(\frac{-\Delta t}{T_1}\right), \qquad (7)$$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

и прогнозируемое время допустимой перегрузки:

$$t_{off} = -T_1 \cdot \ln\left(\frac{\tau_{ycm} - \tau_{off}}{\tau_{ycm} - \tau}\right), \qquad (8)$$

где i – шаг алгоритма; $_i$ – текущий перегрев провода на предыдущем шаге дискретизации по времени, запись которого производится в память, °С, Δt – шаг дискретизации по времени, с, τ_{off} – максимально допустимый перегрев провода, °С.

Далее прогнозируемое время допустимой перегрузки t_{off} сравнивают с допустимым временем отключения T_{off} (время действия исполнительного механизма с учетом запаса ≈0,4 с), и при $t_{off} \le T_{off}$ производится автоматическое отключение защищаемого участка сети, а при $t_{off} > T_{off}$ прогнозируемое время допустимой перегрузки t_{off} сравнивают с временем предупреждения T_{warn} (>20 с) и, если $t_{off} \le T_{warn}$, подают предупреждающий сигнал о возможности повреждения провода (кабеля).

Установившийся перегрев провода определяется зависимостью $\tau_{ycm} = \tau_\Theta \cdot K_i^2$, где τ_Θ – установившийся перегрев провода при K_i=1°С.

Отдельные вычислительные и логические операции, которые выполняет МПТЗ, реализуются программно.

Рассмотрим особенности применения полученной защитной характеристики МПТЗ для наиболее широко используемых в электроустановках сетей жилых, административных и коммерческих зданий кабельно-проводниковых изделий типов ПВС (аналогичны ВВГ), ШВВП, АВВГ, АППВ. Они отличаются конструкцией (плоские, круглые), толщиной и составом изоляции. В частности, провод ШВВП с 1-слойной изоляцией имеет меньшую постоянную времени нагрева и требует применения дополнительной защитной характеристики. Необходимо учесть и разброс в данных измерений температуры жил, вызванный особенностями проведения экспериментов (рис. 9).

Для устранения этих погрешностей защитной характеристики предлагается в выражениях (7), (8) учитывать коэффициент запаса $K_з$=1,2 или 1,4 и находить установившийся перегрев провода как $\tau_{ycm}/K_з$, а постоянную времени нагрева (охлаждения) как $T_1 \cdot K_з$.

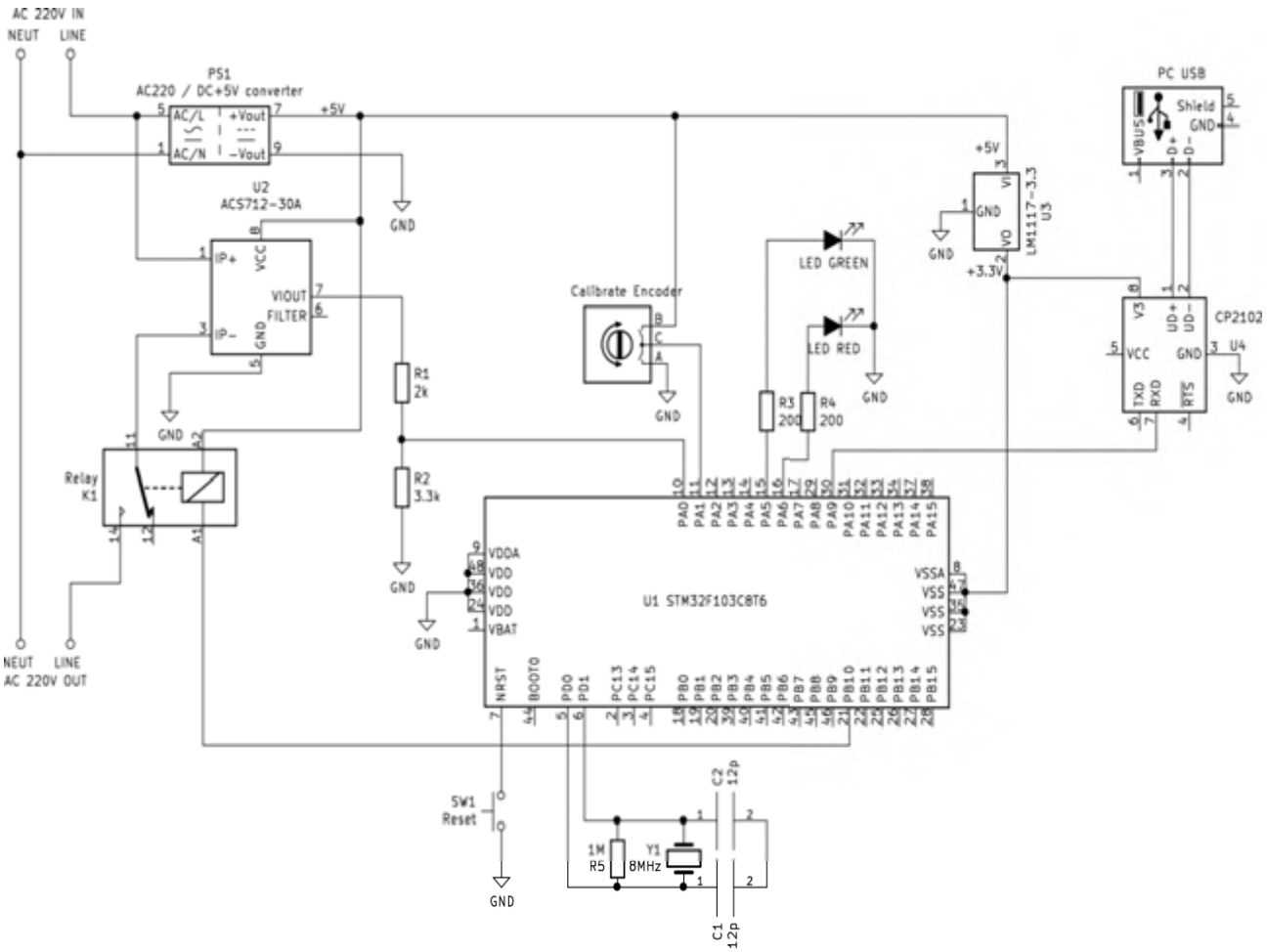
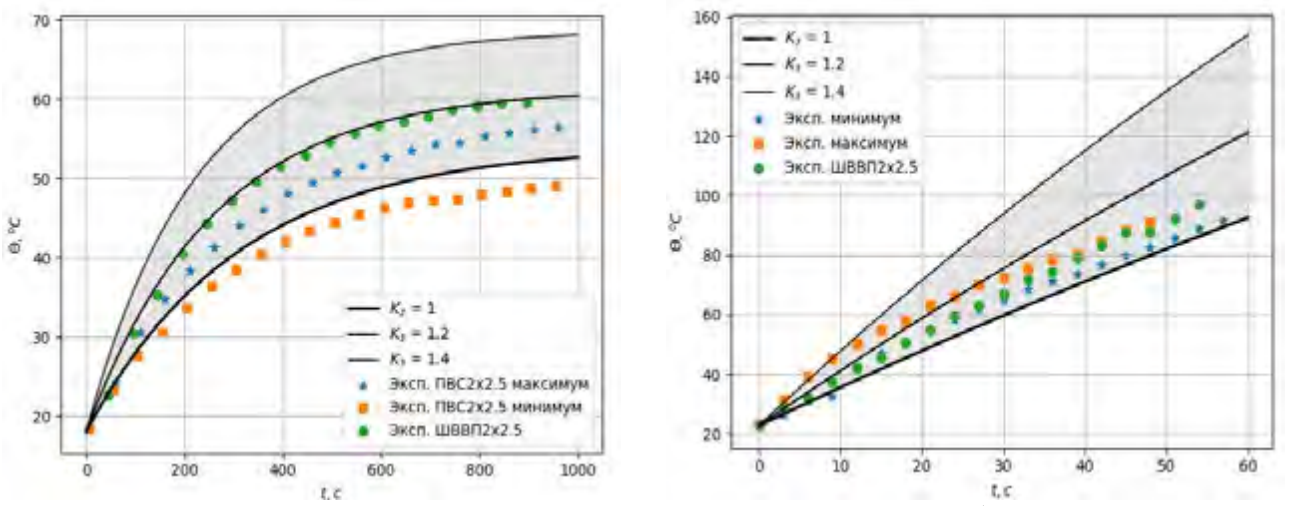


Рис. 8. Принципиальная схема МПТЗv1.0

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 9. Корректировка защитных характеристик МПТЗ для 2-жильных медных проводов сечением 2,5 мм^2: *а* – K_i=1; *б* – K_i=3

МПТЗ при работе по приведенному алгоритму формирует новые, более совершенные, по сравнению с существующими, защитные характеристики электрических сетей жилых, административных и коммерческих зданий в режиме токовой перегрузки и при замыканиях через переходное сопротивление или сопротивление электрической дуги.

Выводы

С помощью численного моделирования в программных средах Elcut 6.3, ComsolMultiphysics 5.3a и экспериментальных измерений получены характеристики динамики нагрева электрическим током двухжильного изолированного кабеля ВВГ 2×2,5 с 2-слойной изоляцией, охлаждаемого в результате свободно-конвективного теплообмена с окружающим воздухом с коэффициентом Ra=5·10^4 (открытый способ прокладки).

Сопоставление расчетов, выполненных методом конечных элементов в указанных программных средах, с данными экспериментов показывает соответствие с расчетами на уровне ±6 % при кратности тока по отношению к длительно допустимому K_i=0,5...2.

Для предотвращения пожароопасного действия режима перегрузки электрическим током в электропроводках 220 В и увеличения срока эксплуатации предлагается за счет оптимизации контроля ВТХ и динамики теплового режима провода обеспечить возможность корректного и своевременного отключения защищаемого участка сети.

Широко используемые кабельно-проводниковые изделия типов ПВС (аналогичны ВВГ), ШВВП, АВВГ, АППВ имеют конструктивные отличия, поэтому их постоянные времени нагрева и установившиеся температуры нагрева подвержены разбросу. Предложенный способ корректировки защитной характеристики МПТЗ, учитывающий рекомендованный коэффициент запаса $K_з$, позволяет полностью превысить зону разброса температурных характеристик нагрева проводов во времени.

Список литературы

1. Электротехнический справочник. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. – М.: Энергоатомиздат, 2003. Т.2. – С. 359-363.
2. Пат. на винахід 114380 Україна, МПК(2006) H02H 3/08, МПК(2006) H02H 7/00, МПК(2006) H01H 73/02. Спосіб максимального струмового захисту з вибірковою чутливістю до струмів віддалених коротких замикань та пускових струмів асинхронних електродвигунів / Кобозєв О.С., Середа О.Г., Агабабов А.Ю., Юхно О.Д. – № а 2016 05401; заявл. 18.05.16; опубл. 25.05.17; бюл. №10.
3. Арещенко, Б.В. Разработка алгоритмов устройств интеллектуальной защиты двигателей // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2008. – №1(17). – С. 100-106.
4. Kotb, M.F. Over Current Protection Relay Using Arduino Uno for Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System / M.F. Kotb, M. El-Saadawi, E.H. El-Desouky // Eur. J. Electr. Eng. Comput. Sci. – 2018. – No.5. Vol.2. – P. 38-44.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

5. Design and Construction of a Numerical over Current Relay / MD Rayhanul Amin Rumi et al. // A Thesis Submitted to the EEE Department of BRAC University. – Bangladesh: BRAC University, 2015. – 44 p.
6. Аушев, И.Ю. Предотвращение пожароопасного действия электрического тока в электропроводках напряжением 220 В // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – №2(18). – С. 73-80.
7. Аушев, И.Ю. Динамика нагрева многожильного изолированного проводника электрическим током / И.Ю. Аушев, Ю.А. Станкевич, К.Л. Степанов // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2012. – №2(16). – С. 87-96.

I.A. Bershadskiy /Dr. Sci. (Eng.)/, A.V. Zgarbul, A.A. Kulish
Donetsk National Technical University (Donetsk)

SUBSTANTIATION OF THE METHOD FOR OVERLOAD PROTECTION OF VOLTAGE 220 V ELECTRIC NETWORKS TAKING INTO ACCOUNT THE NONSTATIONARY HEATING OF THE WIRING

Background. *Insufficient coordination of the time-current characteristics of the protection device and the cable leads to a fire situation in the electrical network of 220 V. A mathematical model is developed for heat transfer of 2-core open laying cable based on the equations of convective heat transfer (Fourier-Newton). A comparative analysis of the obtained results and the data of experimental thermal studies of VVG 2x2.5 cable performed.*
Materials and/or methods. *The method for protecting the electrical distribution network from overload currents based on determining the current overheating of the cable in the dynamic load mode, taking into account changes in the parameters of the thermal model. The heating time of the wire constant and the steady heating of the wire set depending on the multiplicity of the overload current.*
Results. *The simulation results compared with experimental data. The maximum value of the relative error of heating the cable core is Δ= ±6 % in the modes of current overloads, not exceeding twice the permissible for the cable. New protective characteristics of electrical wiring formed based on the thermal heating model and the parameters of the model determined.*
Conclusion. *The presented calculation method is generally correct in the given operating conditions of the electric network. In other cases, experimental characteristics used. A method for protecting the electrical distribution network from overload currents implemented on a microprocessor protective device.*

Keywords: *wiring, heating, overload, thermal protection, microprocessor device.*

Сведения об авторах
И.А. Бершадский
SPIN-код: 4772-3504
ORCID iD: 0000-0001-7383-3415
Телефон: +380 (71) 414-28-12
Эл. почта: ibersh164@gmail.com
А.А. Кулиш
Телефон: +380 (71) 358-84-32
Эл. почта: kul.andr.aleks@gmail.com
А.В. Згарбул
Телефон: +380 (71) 465-02-28
Эл. почта: zgarbul.andrey@gmail.com

Статья поступила 29.05.2019 г.
© И.А. Бершадский, А.В. Згарбул, А.А. Кулиш, 2019
Рецензент д.т.н., проф. Э.Г. Куренный

УДК 621.313.333

Е.С. Дубинка
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ КАК СПОСОБ ОГРАНИЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ШАХТНУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ В ПРОЦЕССЕ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ

Научно обоснована рациональность применения индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя в качестве средства технической реализации принципа подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя в процессе защитного отключения шахтной участковой электросети, что создает эффект всестороннего защитного ее обесточивания.

Ключевые слова: *шахта, электротехнический комплекс, короткие замыкания, электротравматизм, электробезопасность, защитное отключение, асинхронный двигатель, обратный энергетический поток, индукционно-динамическое торможение, обратная ЭДС, подавление.*

Постановка проблемы

Электротехнический комплекс (ЭТК) технологического участка угольной шахты представляет собой совокупность асинхронных двигателей (АД) потребителей, кабельных линий и коммутационной аппаратуры. Его условия эксплуатации предполагают перемещения электромеханического оборудования и, как следствие, применение разветвленной радиальной сети гибких кабелей. Таким образом, кабель является наименее механически защищенным элементом шахтного участкового электротехнического комплекса, что и определяет его как источник повышенной потенциальной опасности, объект, где концентрируются аварийные (междуфазные короткие замыкания) и опасные (утечки тока на землю в связи с повреждением изоляции) состояния [1…4].

Все технические решения в области защиты шахтных участковых электротехнических комплексов от аварийных и опасных состояний [5] ориентированы на применение со стороны силовой аппаратуры, коммутирующей энергетический поток участковой комплектной трансформаторной подстанции. Таким образом, их действие сводится к автоматическому защитному отключению участковой электросети. Однако применительно к электротехническому комплексу, содержащему асинхронные двигатели, это решение является недостаточным, поскольку после отключения сети ее опасное состояние поддерживается обратными энергетическими потоками электрических машин, переходящих в состояние выбега.

Исследованиями [6] установлена принципиальная возможность выявления аварийного состояния силового кабеля автономным устройством со стороны силового ввода асинхронного двигателя. Однако дальнейшей проработки требует концепция технической реализации исполнительного устройства, реализующего функцию принудительного подавления обратного энергетического потока электрической машины, адаптированного к промышленным условиям эксплуатации. Решение этой задачи имеет научную и практическую актуальность.

Анализ последних исследований и публикаций

Исследованиями подтверждены факторы, создающие возможность электропоражения и контуры короткого замыкания (КЗ), обусловленные действием обратных энергетических потоков АД после защитного отключения сети. Доказана принципиальная возможность ограничения на допустимом уровне электропоражающих и тепловых параметров шахтной участковой кабельной сети при условии подавления обратных энергетических потоков АД синхронно с защитным отключением сети. Проанализированы способы выявления аварийного состояния кабеля, а также обоснована рациональность применения автономно действующих защитных устройств на вводе каждого АД [7]. Однако открытым остается вопрос технической реализации исполнительного устройства подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя. Достаточно перспективными можно считать ре-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

зультаты исследований процесса подавления обратной электродвижущей силы (ЭДС) АД путем управления электромагнитным состоянием (параметрами) электрической машины. В частном случае [8] может быть замкнута накоротко отключенная от сети обмотка статора двигателя. Однако в общем случае для подобного эффекта асинхронный двигатель должен комплектоваться дополнительной статорной обмоткой, что нерационально [8]. В то же время, существует возможность достичь эффекта подавления обратной ЭДС АД применением его индукционно-динамического торможения. Представляется целесообразным исследовать этот процесс.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является определение возможности использования режима индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя для обеспечения безопасных параметров шахтной участковой электрической сети на начальном интервале времени после ее защитного отключения.

Основной материал исследования

Электропоражающим факторам и электрическим параметрам, поддерживающим опасный тепловой режим короткого замыкания после защитного отключения шахтной участковой электрической сети, остается ЭДС вращения асинхронного двигателя потребителя. Как известно, ее параметры обусловлены величиной токов ротора АД и его частотой вращения [7]:

$$u_{вр} = \frac{Lm}{L_p} j(1-S)\omega_0 \psi_{op} e^{-\frac{t}{T_p}} e^{j\omega_0(1-s)t},$$

где L_m – индуктивность намагничивания АД; L_p – полная индуктивность ротора; S – скольжение; ω_0 – синхронная частота вращения ротора; t – время; T_p – постоянная затухания свободного тока ротора; ψ_{op} – потокосцепление обмотки ротора.

В то же время, потенциальная опасность ЭДС вращения обусловлена как ее величиной, так и продолжительностью существования. Этим обусловлена целесообразность ускоренного подавления обратных энергетических потоков АД, в частности, способом индукционно-динамического торможения (ИДТ) АД.

Режим ИДТ формируется схемой (рис. 1), в которой тиристором VS2 создается контур короткого замыкания между фазами статора асинхронного двигателя, причем ток этого контура (в фазах статора) совпадает по направлению с током динамического торможения, созданного цепью тиристора VS1 (рис. 2). (Импульсы тока цепи короткого замыкания, имея значительную амплитуду, создают тормозной момент АД повышенной величины:

$$M_T = \frac{n_\phi I_T^2 r_p}{\omega_0 S_н},$$

где n_ϕ – число фаз присоединения; $S_н$ – скольжение АД в начале интервала торможения; ω_0 – синхронная частота вращения ротора; r_p – сопротивление ротора; I_T – тормозной ток.

Создается эффект ускоренной остановки ротора, а следовательно, подавления ЭДС вращения АД. Общая интенсивность замедления ротора АД регулируется величиной углов отпирания тиристоров VS1 и VS2.

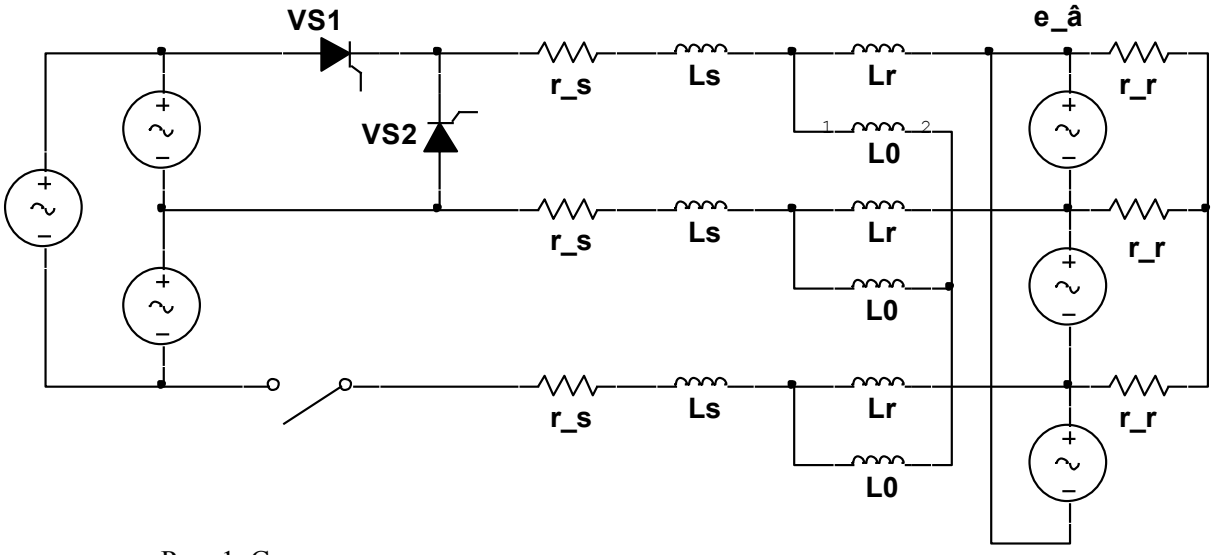


Рис. 1. Схема для исследования процесса индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

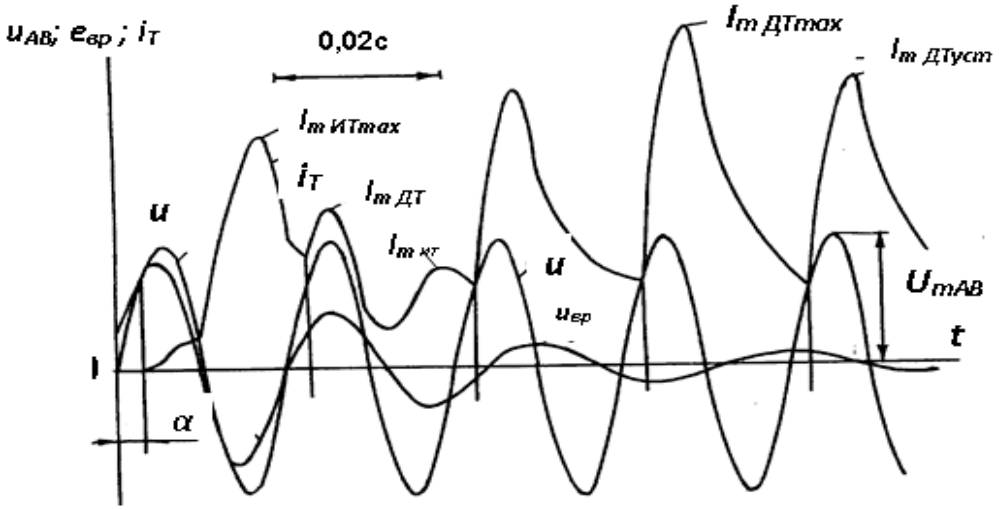


Рис. 2. Диаграммы формирования тока статора асинхронного двигателя в процессе его индукционно-динамического торможения: α – угол отпирания тиристора VS1

Рассмотрим модель процесса индукционно-динамического торможения АД в контексте реализации способа ускоренного подавления обратного энергетического потока.

При моделировании принимаем следующие допущения: в сети действует трехфазная система напряжения промышленной частоты; аварийный (опасный) режим возникает в середине кабеля подключения к АД; защитное отключение напряжения питания выполняется групповым автоматическим выключателем через 0,2 с после возникновения аварийного (опасного) состояния; в качестве причины защитного отключения принимается возникновение цепи утечки тока на землю сопротивлением 1 кОм (что соответствует сопротивлению тела человека в соответствии с ГОСТ 22929-78 [9]), а также режим двухфазного короткого замыкания; номинальное линейное напряжение сети 1140 В; частота 50 Гц; асинхронный двигатель типа ЭКВ4-250, мощностью 250 кВт, сечение силовых жил кабеля варьируется от 25 мм^2 до 95 мм^2, тип питающей подстанции КТПВ-1000 [10, 11]. Структурная схема модели фрагмента ЭТК представлена на рис. 3.

Модель фрагмента ЭТК содержит: SIFU – систему импульсно-фазового управления тиристорами VS1, VS2; КА1, КА2 – коммутационные аппараты; АВ – автоматический выключатель; Rut – возникновение утечки тока на землю (1 кОм); асинхронный двигатель типа ЭКВ4-250, КТП – комплектную трансформаторную подстанцию. Процесс ИДТ АД начинается в момент возникновения аварийного (опасного) состояния электросети, т.е. до защитного отключения энергетического потока со стороны участковой трансформаторной подстанции.

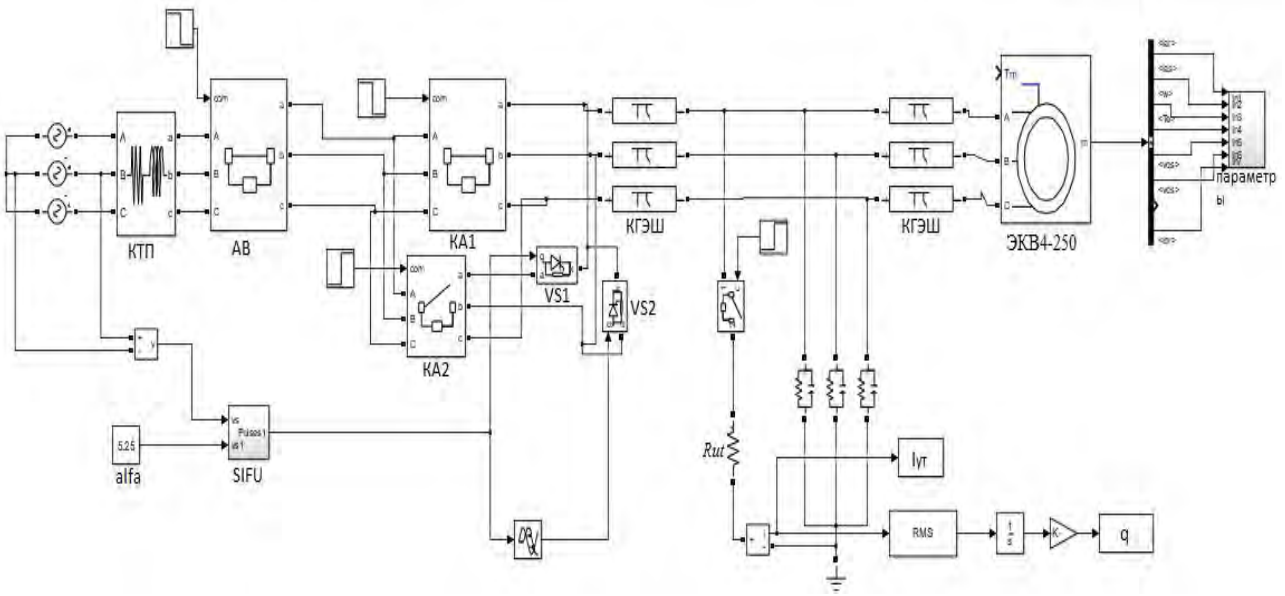


Рис. 3. Структурная схема модели фрагмента ЭТК

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Результаты моделирования процессов в электротехническом комплексе при возникновении цепи утечки тока на землю представлены на рис. 4…8.

Анализ полученных диаграмм тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки (без учета компенсации емкостной составляющей тока утечки) позволяет сделать вывод о превышении уровня количества электричества через человека нормированной величины по критерию электробезопасности (50 mA·c) [9], даже после защитного отключения сети (момент *t*2). Наличие обратных ЭДС асинхронных двигателей потребителей, переходящих в режим выбега после отключения сети, подтверждает предположение о формировании эффекта поддержания опасного состояния электросети участка, а параметры энергетического потока достигают уровня представляющего опасность электропоражения (при возникновении цепи утечки тока на землю).

Исследованием компьютерной модели (см. рис. 3) подтвержден положительный эффект процесса ИДТ АД в контексте устранения опасных факторов участковой шахтной электросети после ее защитного отключения (q>50 mA·c).

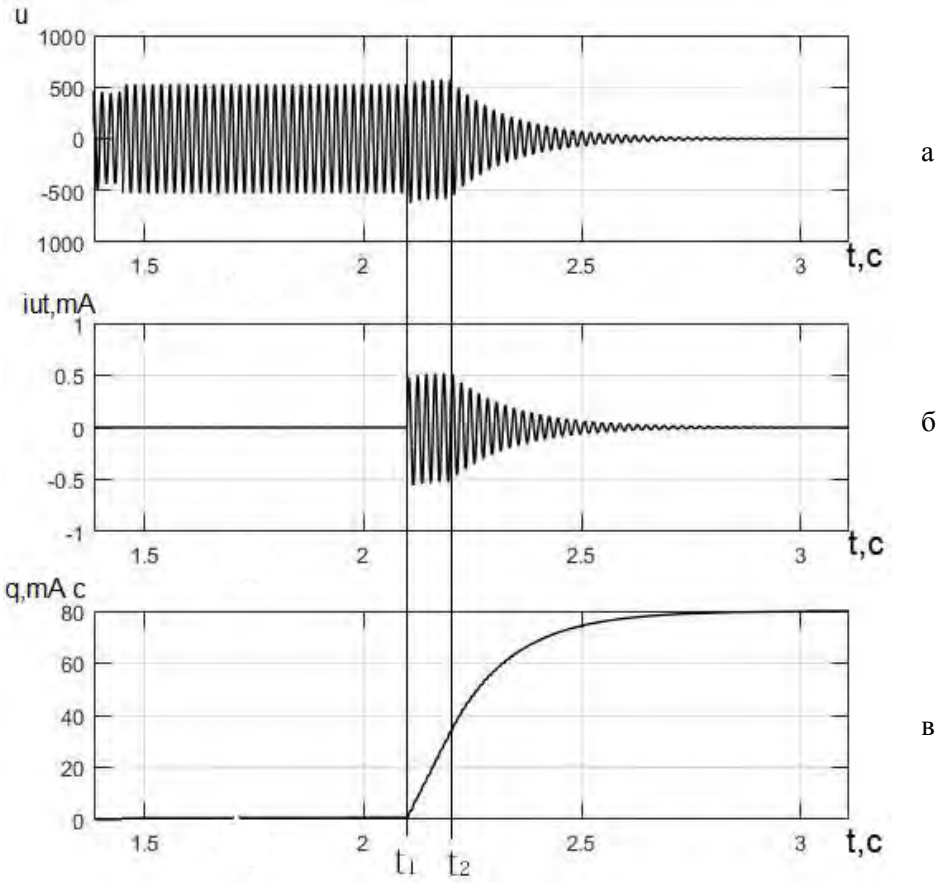


Рис. 4. Диаграммы величин: *а* – выбега; *б* – утечки тока на землю; *в* – количества электричества при отсутствии воздействия со стороны ИДТ

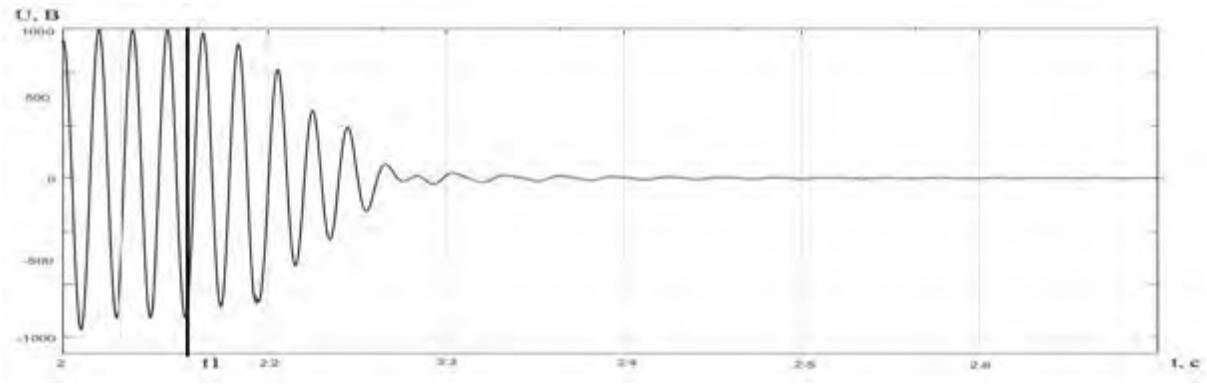


Рис. 5. Диаграмма напряжения статора АД типа ЭКВ 4-250 мощностью 250 кВт на интервале перехода из двигательного режима в режим ИДТ

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

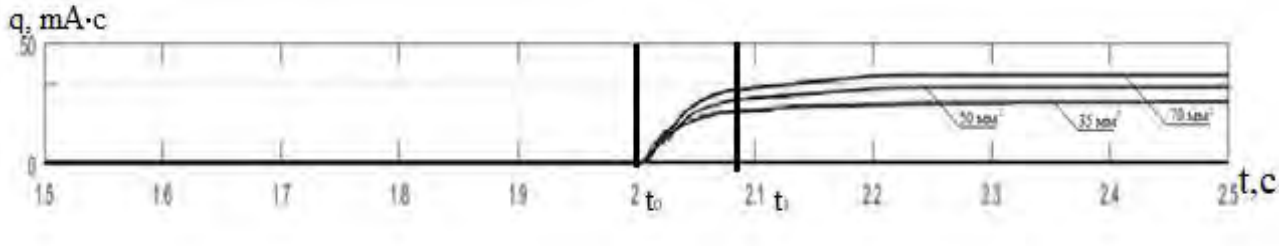


Рис. 6. Диаграммы величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю, $R_{ут}$=1 кОм, для кабелей марки КГЭШ сечением 35 мм^2, 50 мм^2 и 70 мм^2 при величине угла отпирания тиристора VS1 α=30 эл. град., по схеме рис. 3

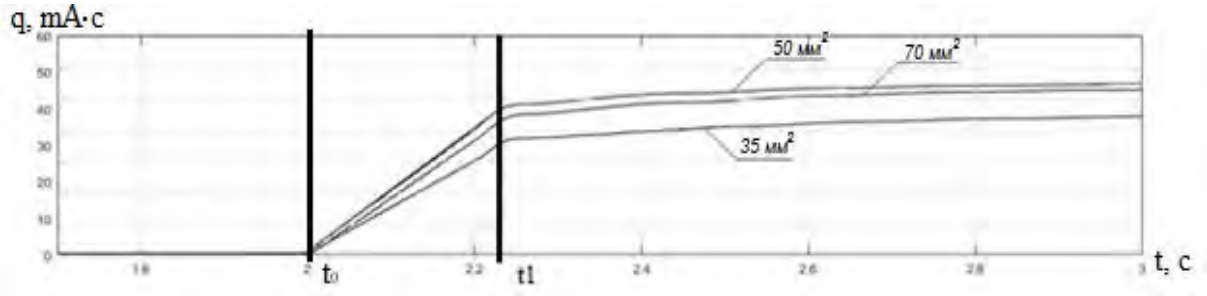


Рис. 7. Диаграммы величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю, $R_{ут}$=1 кОм, применительно к фрагменту электросети с кабелем марки КГЭШ сечением 3х35 мм^2, 3х50 мм^2 и 3х70 мм^2 при использовании ИДТ и величине угла отпирания тиристора VS1 α=45 эл. град., по схеме рис. 3

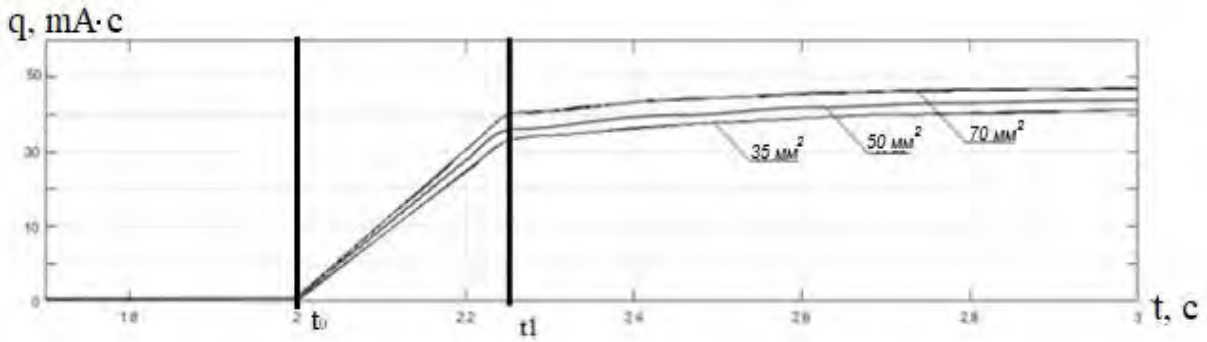


Рис. 8. Диаграммы величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю, $R_{ут}$=1 кОм, применительно к фрагменту электросети с кабелем марки КГЭШ сечением 3×35 мм^2, 3×50 мм^2 и 3×70 мм^2 при использовании ИДТ и величине угла отпирания тиристора VS1 α=60 эл. град., по схеме рис. 3

При этом установлены зависимости интенсивности замедления ротора АД, количества электричества в цепи утечки тока на землю от величины угла α отпирания тиристора VS1, что иллюстрируется рис. 5…8. Установлено, что в сети линейного напряжения 1140 В при использовании кабеля КГЭШ 3х70 в цепи питания двигателя мощностью 250 кВт электробезопасность состояния после защитного отключения будет поддерживаться при использовании режима ИДТ с углом отпирания тиристора VS1 α≤60 эл. град. При этом угол отпирания тиристора VS2 может оставаться равным нулю (эл. град.), а задержка на включение в работу этого тиристора может составлять 7±2 мс. Последнее обстоятельство крайне важно в контексте практической реализации, поскольку позволяет применять вместо этого тиристора диод, коммутируемый вакуумным однополюсным контактором, например серии SPVC отечественного производства [12].

Моделированием установлен также положительный эффект режима ИДТ АД в процессе выполнения защитных функций при отключении междуфазного КЗ в кабеле питания АД. Диаграмма тока статора АД (рис. 9) в режиме ИДТ, полученная в компьютерной модели (см. рис. 3), соответствует расчетным диаграммам (см. рис. 2), что позволяет сделать вывод об адекватности модели исследуемому процессу.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

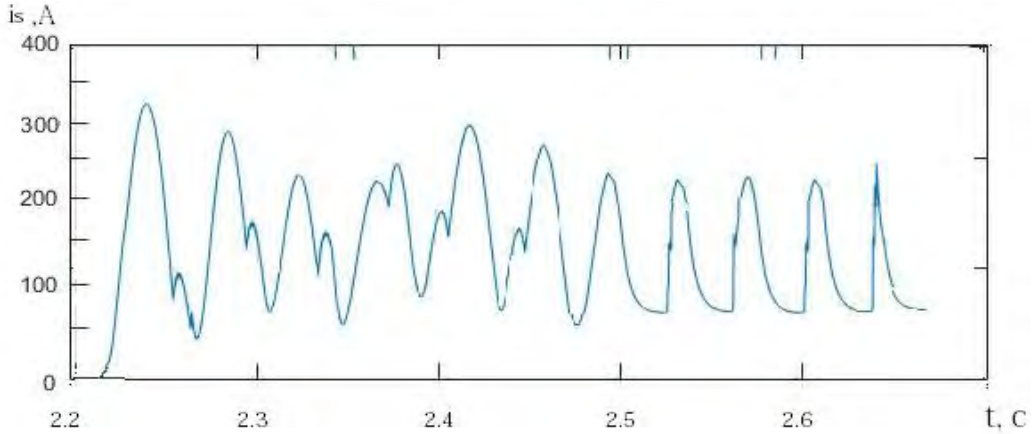


Рис. 9. Диаграмма тока статора АД типа ЭКВ4-250 при ИДТ

На рис. 10 и 11 представлены токи в цепи трехфазного КЗ в питающем кабеле без эффекта ИДТ АД и при наличии такого эффекта. Теплоэнергетика процесса представлена следующими показателями (табл. 1).

Применение режима ИДТ АД приближает энергетические показатели процесса междуфазного КЗ к нормируемым параметрам продолжительности защитного отключения без учета воздействия обратных энергетических потоков двигателя.

Реально, с учетом защитного отключения энергетического потока участковой КТП ее силовым коммутационным аппаратом, процесс ИДТ АД, начатый в момент возникновения аварийного (опасного) состояния сети, будет протекать не в полной мере, т.к. после отключения коммутационного аппарата КТП (спустя t=0,1с с момента аварии) прекратится условие протекания тока через тиристор VS1 (см. рис. 1). Тогда процесс будет продолжен индукционным торможением (включенное состояние тиристора VS2 (см. рис. 1) с углом отпирания α=0 эл. град.).

Табл. 1. Теплоэнергетика процесса трехфазного короткого замыкания

Линейное напряжение, В	Мощность КТП, кВА	Марка кабеля, сечение, мм^2	Длина кабеля общая, м	Длина кабеля до точки КЗ, м	Тепловая мощность в точке КЗ, Вт		
					$t_{к.з.}$=0,1 с	$t_{к.з.}$=0,1 с	ИДТ
					Без учета ЭДС АД	С учетом ЭДС АД	В процессе отключения контактора (0,1 с)
660	630	50	200	100	1,2	3,1	0,7
	1000	50	200	100	0,6	1,4	0,3
1140	630	50	200	100	4,25	8,5	3,4
	1000	50	200	100	2,3	2,7	1,8

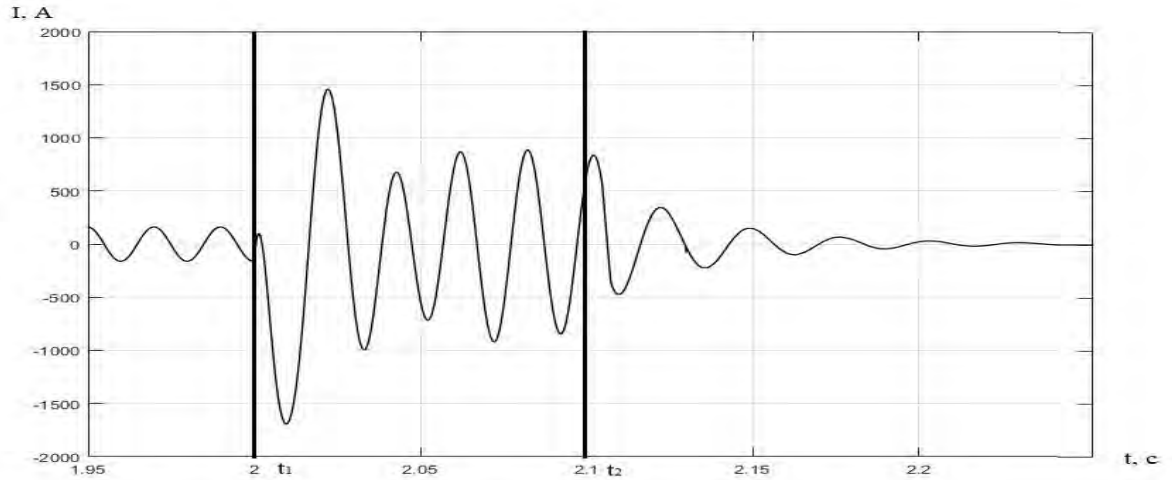


Рис. 10. Диаграммы тока в цепи трехфазного КЗ в питающем кабеле без учета эффекта ИДТ АД: t_1 – начало аварийного процесса; t_2 – отключение коммутационного аппарата, начало процесса ИДТ

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Уточненные диаграммы электрических параметров в питающем кабеле в режиме утечки тока на землю и в режиме трехфазного КЗ представлены на рис. 12 и 13.

Они свидетельствуют о целесообразности применения индукционно-динамического и последующего индукционного торможения как эффективного инструмента прекращения опасного состояния сети после ее защитного отключения.

Уточненная энергетика процесса трехфазного КЗ представлена данными табл. 2.

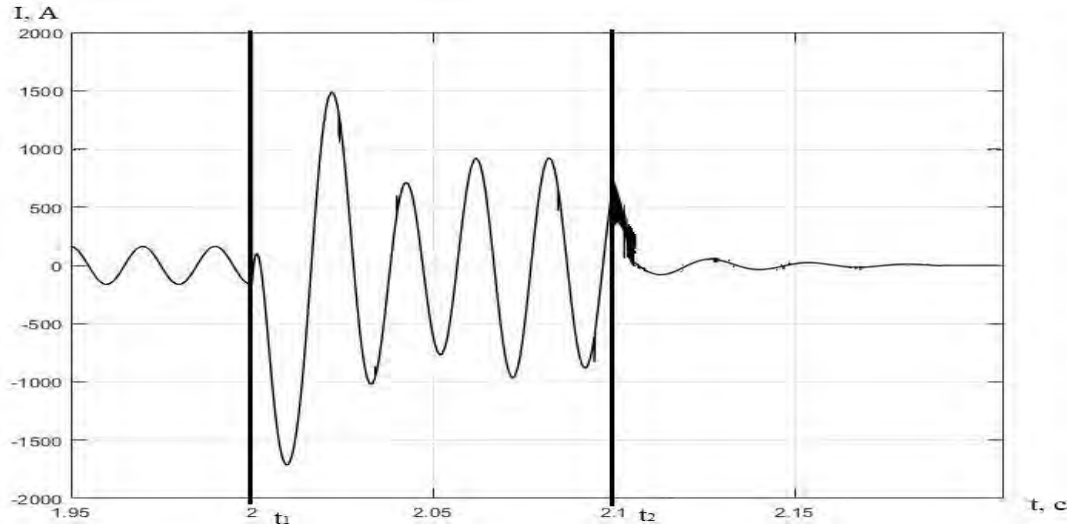


Рис. 11. Диаграммы тока в цепи трехфазного КЗ в питающем кабеле с учетом эффекта ИДТ АД: t_1 – начало аварийного процесса; t_2 – отключение коммутационного аппарата, начало процесса ИДТ

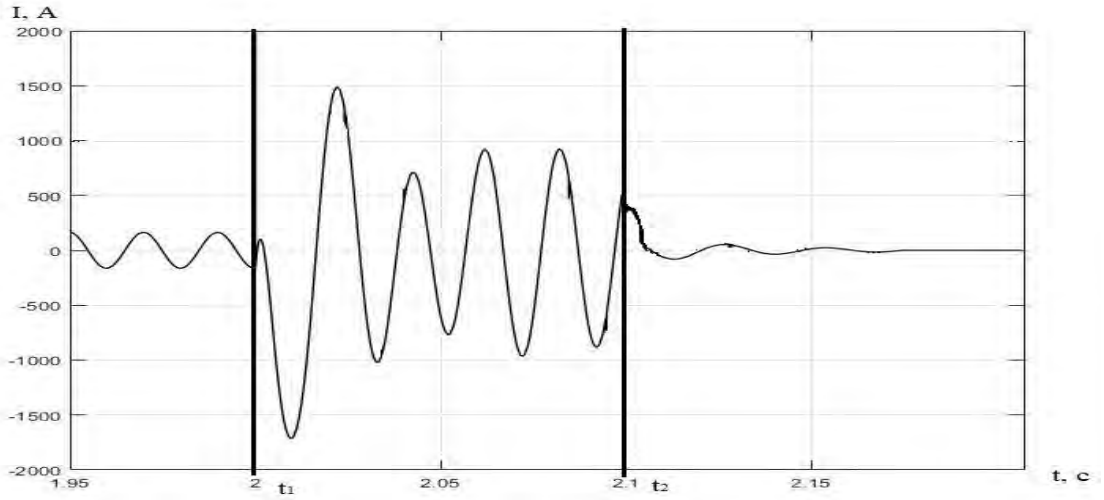


Рис. 12. Уточненные диаграммы тока в цепи трехфазного КЗ в питающем кабеле с учетом эффекта ИДТ АД в точке А1, по схеме рис. 7: t_1 – возникновение аварийной ситуации; t_2 – отключение коммутационного аппарата

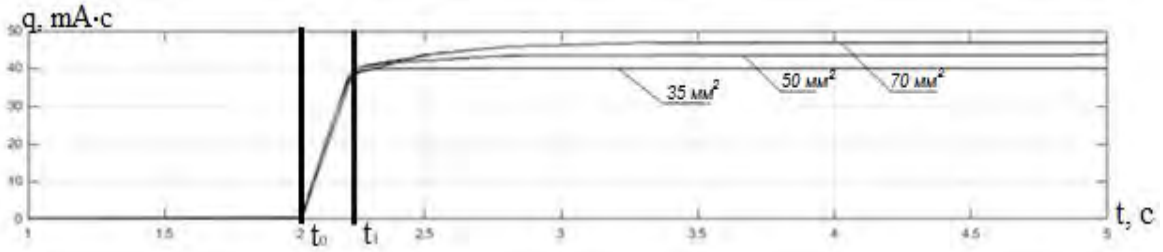


Рис. 13. Уточненные диаграммы величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю, $R_{ут}$=1 кОм, для кабелей марки КГЭШ сечением 3×35 мм^2, 3×50 мм^2 и 3×70 мм^2 с использованием ИДТ, при величине угла отпирания тиристора VS1 α=60 эл. град., по схеме рис. 3

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 2. Уточненная теплоэнергетика процесса трехфазного короткого замыкания

Линейное напряжение, В	Мощность КТП, кВА	Марка кабеля, сечение, мм^2	Длина кабеля общая, м	Длина кабеля до точки КЗ, м	Тепловая мощность в точке КЗ, Вт		
					$t_{к.з.}$=0,1 с	$t_{к.з.}$=0,1 с	ИДТ
					Без учета ЭДС АД	С учетом ЭДС АД	В процессе отключения контактора (0,1 с)
660	630	50	200	100	1,2	3,1	1,1
	1000	50	200	100	0,6	1,4	0,5
1140	630	50	200	100	4,25	8,5	4,25
	1000	50	200	100	2,3	2,7	1,97

Выводы

Исследованиями установлена целесообразность применения индукционно-динамического и последующего индукционного торможения асинхронного двигателя потребителя в качестве способа прекращения опасного состояния шахтной участковой электрической сети после защитного отключения утечки тока на землю либо междуфазного КЗ.

Доказана возможность применения упрощенной схемы реализации процесса на основе использования диодно-контакторной силовой схемы.

Направлением дальнейших исследований может служить проблематика технической реализации процесса подавления обратного энергетического потока АД на основе применения его индукционно-динамического и последующего индукционного торможения.

Список литературы

1. High voltage mining equipment for use underground: handbook. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2007. – 68 p.
2. Риман, Я.С. Защита подземных электрических установок угольных шахт. – М.: Недра, 1977. – 206 с.
3. Groh, H. Explosion protection: electrical apparatus and systems for chemical plants, oil and gas industry, coal mining. – Amsterdam; London: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – 524 p.
4. Berryann, R.J. Evolution of Longwall Mining and Control Systems in the United States [Electronic resource] / R.J. Berryann, J.A. Voelker // Mine Safety and Health Administration, Division of Electric Safety. – Triadelphia, West Virginia, 2005. – Available at: https://pdfs.semanticscholar.org/6827/53887a0b319296f716beb11b9f01273115a1.pdf?_ga=2.1670840.803898779.1508794395-959523617.1508794395
5. Колосюк, В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
6. Маренич, К.М. Наукові основи впровадження автоматичного захисного двобічного знеструмлення шахтної дільничної електромережі: монографія / К.М. Маренич, І.В. Ковальова. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – 125 с.
7. Маренич, К.Н. Теоретические основы и принципы применения защитного обесточивания рудничных электротехнических комплексов: монография. – Донецк: Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2015. – 234 с.
8. Дубинка, Е.С. Управление электромагнитным состоянием асинхронной машины как способ ограничения параметров обратного энергетического потока / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – №4. Т.17. – С. 39-47.
9. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 Вт. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. Введ. 1979-01-01; внес. изм. согл. ИУС 11-80, 7-81, 11-83; соответствует СТ СЭВ 2309-80. – Москва: Изд-во стандартов, 1987. – 13 с.
10. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. / В.С. Дзюбан [и др.]; под ред. Б.Н. Ванеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: Юго-Восток Лтд, 2001. – Т.1. (Гл.1-21). – 477 с.
11. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. / В.С. Дзюбан [и др.]; под ред. Б.Н. Ванеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: Юго-Восток Лтд, 2001. – Т.2. (Гл.22-44). – 440 с.
12. Контактор однофазный вакуумный серии SPVC. Техническое описание: Контактор серии SPVC, завод «Таврида», Севастополь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.masters.donntu.org/2008/fema/tarasenko/library/5.htm

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

E.S. Dubinka
Donetsk National Technical University (Donetsk)

INDUCTION DYNAMIC BRAKING OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR AS A WAY OF RESTRICTING THE ENERGY EXPOSURE TO A MINE ELECTRIC NETWORK IN THE PROCESS OF PROTECTIVE TRIPPING

Background. *The paper considers the technical solution for restricting the parameters of back EMF of the induction motor, which is necessary to the suppression of the inverse energy flux of the induction motor of mine multimachine electrotechnical complex (ETC) in the state of free running after tripping the mains.*
Materials and/or methods. *The electrical cable network of the technological section of the mine is the object most prone to damage due to mechanical influences. All this creates a risk of ignition of the equipment in the state of a phase-to-phase short circuit, as well as a threat of electrical injury if the cable insulation is damaged. The emergency (hazardous) condition prevented by protective tripping of the mine site transformer substation. However, in electrical systems equipped with asynchronous motors, the dangerous state will be maintained by the back energy fluxes of these electric machines. At the present stage, the possibility proved of detecting the emergency condition of the power grid by autonomous devices on the inlets of the engines.*
Results. *The rationality of application of induction-dynamic braking of the asynchronous motor as a means of technical implementation of the principle of suppression of the inverse energy flow of the asynchronous motor in the process of the protective shutdown of the mine power supply network that creates the effect of comprehensive protective tripping scientifically proved.*
Conclusion. *The studies have established the feasibility of induction-dynamic and subsequent induction braking of the induction motor of the consumer as a way to stop the dangerous state of the mine electrical network after the protective shutdown of the current leakage to the ground or phase-to-phase short circuit. The possibility proved of applying a simplified implementation scheme of the process based on the use of diode-contactor power circuits.*

Keywords: *mine, electrical complex, short circuit, electrical injury, electrical safety, protective tripping, asynchronous motor, reverse energy flux, induction-dynamic braking, reverse EMF, suppression.*

Сведения об авторе
Е.С. Дубинка
SPIN-код: 3110-5247
ORCID: 0000-0002-3003-6421
Телефон: +380 (71) 302-74-94
Эл. почта: ekaterina_sd@bk.ru

Статья поступила 26.04.2019 г.
© Е.С. Дубинка, 2019
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко



УДК 621.355

В.И. Калашников /к.т.н./, А.А. Чепига
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИИ VEHICLE-TO-GRID

Проведен анализ концепции vehicle-to-grid. Рассмотрена возможность применения технологии в современной энергосистеме. В результате изучения работ различных исследователей выявлены преимущества и недостатки, которые позволили определить эффективность аккумуляторов электромобилей как накопителей электроэнергии.

Ключевые слова: *vehicle-to-grid, аккумуляторы, электромобили, накопители электроэнергии.*

Постановка проблемы

Проблема развития альтернативной энергетики, которая основана на использовании энергии ветра, солнца и топливных элементов, во всем мире вызывает огромный интерес, и ученые стараются найти новые технологии, новые устройства, которые могли бы аккумулировать энергию, хранить ее и использовать при необходимости [1]. Одним из главных препятствий при создании накопителей электроэнергии является задача балансировки подачи в сеть энергии, которая получена от возобновляемых источников, в соответствии с потребностями потребителей. Одним из вариантов решения этой проблемы является концепция vehicle-to-grid (V2G), которая напрямую принимает участие в управлении спросом на электроэнергию и помогает избавиться от данной сложности.

Анализ последних исследований и публикаций

Проблема накопления «зеленой» энергии является весьма актуальной в условиях ухудшения экологической составляющей планеты. В этой связи создание и внедрение новых технологий стабилизации электрической сети представляет собой важную задачу для исследователей. При проведении исследований были использованы разработки зарубежных и отечественных теоретиков и практиков. Так, анализ различных зарядных устройств, а также мест их установки, позволяющий выбрать эффективное решение для концепции, был изложен Х. Гобаром [2], З. Саламехом [3], а также К. Чау [4].

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является анализ концепции двухстороннего использования электромобилей, подразумевающей подключение машины в общую электрическую сеть для подзарядки автомобиля с возможностью выдачи электроэнергии обратно в сеть для участия в управлении спросом на электроэнергию, а также выявление преимуществ и недостатков данной технологии.

Основной материал исследования

Для приведения в движение электромобилей (ЭМ) используются как синхронные, так и асинхронные двигатели [5]. Электромобиль заряжается от источника электроэнергии, который находится вне транспортного средства, он может быть автономным – от солнечной батареи или водородного генератора, преобразующего топливо в электричество. Будущее транспорта – более эффективные системы электропривода. При рассмотрении большого количества современных электромобилей, а также мощности их систем хранения энергии были предложены дополнительные преимущества их применения как накопителей энергии. Однако есть много вопросов: какое дополнительное оборудование и программное обеспечение потребуется для доставки накопленной энергии; какие коммуникационные системы нужны; можно ли это сделать, не затрагивая потребности водителя; каково будет влияние на срок службы батареи; какие мотивы существуют для достижения этого и кто выигрывает от этой идеи.

Технология V2G подразумевает возможность организации контролируемого и двунаправленного потока электрической энергии между транспортным средством и электрической сетью. Электрическая энергия поступает от сети к автомобилю, для того чтобы зарядить батарею. Электрическая энергия отдается от транспортного средства в сеть, когда электроэнергетической компании необходима энергия, например, для обеспечения пиковой мощности. Исследования показывают, что транспортные средства не используются для активных перевозок более 90 % времени [6]. Поэтому в это время батареи ЭМ могут использоваться для обслуживания рынков электроэнергии без ущерба для их основной транспортной функ-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ции. Технология V2G включает в себя концепции vehicle-to-home (когда электромобиль находится дома) или vehicle-to-building (когда электромобиль находится в коммерческом здании). В этих случаях батарея может использоваться для питания электрической нагрузки.

Электрическая энергия, которая хранится внутри батареи электромобилей, может быть использована для ограничения максимума нагрузки и повышения качества электрической энергии. Ограничения максимума нагрузки – это ограничение нагрузки в пиковое время. В концепции smart grid электромобиль может стать важной частью сети и действовать как распределенный источник электроэнергии. ЭМ обеспечит хранение и поддержит стабильность сети путем отдачи необходимого количества мощности с меньшим загрязнением окружающей среды. Прежде чем интегрировать ЭМ в сеть, чтобы передать мощность обратно в энергосистему, необходимо выполнить несколько условий:

– по стандарту IEEE 519 общее искажение гармоник должно быть ниже 5 %, поскольку оно напрямую связано с загрязнением сети;

– коэффициент мощности должен быть близок к единице;

– транспортное средство должно иметь достаточное количество заряда, зарезервированного в аккумуляторе.

Для зарядки или разрядки энергии задействуются три системных компонента: место, где ЭМ соединяется с электрической сетью; оборудование питания ЭМ, к которому подключается транспортное средство; аккумулятор для ЭМ с системой контроля заряда. Место, где ЭМ соединяется с электрической сетью, может быть домом владельца, парковкой или общественной зарядной станцией. ЭМ могут питаться от источников постоянного и переменного тока на различных уровнях мощности. Каждый ЭМ может иметь несколько компонентов для управления и регулирования скорости зарядки аккумулятора. Все эти компоненты играют определенную роль в определении режимов работы и функциональности.

Общество автомобильных инженеров установило уровни зарядки переменного и постоянного тока, как показано в табл. 1 и рис. 1 [7].

Табл. 1. Уровни мощности зарядных устройств

Зарядное устройство переменного тока	Зарядное устройство постоянного тока
Mode 1: 240 В, однофазное, максимум 16 А, максимум 3,8 кВт	Mode 1: 200…450 В, максимум 80 А, максимум 19,2 кВт
Mode 2: 240 В, однофазное, максимум 32 А, максимум 19,2 кВт	Mode 2: 200…450 В, максимум 200 А, максимум 90 кВт
Mode 3: подлежит определению, может быть трехфазным	Mode 4: подлежит определению, может охватывать 200…600 В, максимум 400 А, максимум 240 кВт



Рис. 1. Базовая структура зарядных устройств

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Питание из сети подается в виде переменного тока в помещения, где установлено оборудование питания ЭМ. Аккумуляторы ЭМ хранят постоянный ток. Таким образом, для завершения зарядки требуется преобразование переменного тока в постоянный. И, наоборот, при работе в режиме V2G постоянный ток в батарее ЭМ необходимо преобразовать в переменный, для того, чтобы вернуть его в сеть.

Владельцы ЭМ смогут заряжать свои транспортные средства в четырех местах: по месту жительства или на основной ночной парковке; по месту работы; в автопарке; на коммерческих станциях.

При наличии необходимой инфраструктуры владельцы ЭМ будут подзаряжать аккумуляторы по месту жительства. Однако ЭМ придется парковать на долгое время. Необходимо учитывать, что тарифы на коммунальные услуги являются низкими в нерабочие вечерние часы, ранние утренние часы и в выходные дни. Поэтому владельцам ЭМ рекомендуется заряжать свои автомобили в это время.

Ожидается, что большая часть зарядки жилых помещений будет осуществляться через зарядку Mode 2 переменного тока, поскольку она имеет более короткое время зарядки по сравнению с Mode 1 переменного тока. Производители оборудования для зарядки переменного тока Mode 2 обеспечат различные функции (т. е. базовую зарядку, коммуникационный модуль, измеритель дохода и многофункциональный сенсорный экран). Следовательно, на основе предоставленных функций некоторые версии этого оборудования могут быть в пределах финансовой досягаемости владельцев ЭМ. Хотя зарядка переменного тока Mode 1 требует более длительного времени, некоторым владельцам ЭМ может быть достаточно восстановить емкость аккумулятора за ночь, однако Mode 1 (при наличии) вызывает перегрузку для жилых сервисных панелей, а Mode 2 постоянного тока непрактичен для дома из-за значительных затрат, необходимых для обновления коммунальной сети.

Идут споры о важности взимания платы на рабочем месте в учреждениях работодателя. Преимущества для работодателей или коммерческих хостов в плане взимания платы заключаются в предоставлении услуг своим клиентам и потенциальном доходе от рекламы. Однако работодатели могут сталкиваться с такими трудностями, как налоги, стоимость оборудования и инфраструктуры для зарядки ЭМ и управление имеющимися зарядными станциями. Кроме того, коммерческие хосты могут испытывать трудности, такие как дополнительная нагрузка на их объект, соответствующие расходы по требованию от их поставщика энергии и потеря общих парковочных мест.

ЭМ, прибывающие на работу, будут полностью заряжены до часов пикового спроса в этом районе. Затем эти ЭМ как агрегированное хранилище могут предложить более дешевое решение для удовлетворения требований пикового спроса. Также их можно использовать для энергообеспечения здания (vehicle-to-building, V2B) или поставить резервную мощность для критических бизнес-операций. Некоторые батареи ЭМ могут быть разряжены во время пика и могут не успеть зарядиться для домашней сети. Поэтому каждый владелец ЭМ должен будет определить минимальный уровень заряда аккумулятора для своего ЭМ, который будет использоваться для поездок после работы. В V2B владелец здания получает выгоду от снижения стоимости энергии, а владельцы ЭМ получают платежи от объекта за использование батареи.

Парк транспортных средств – это группы транспортных средств, принадлежащих или арендованных предприятием, государственным учреждением или другой организацией, а не отдельным лицом или семьей. Примерами являются транспортные средства, эксплуатируемые компаниями по прокату автомобилей, компаниями такси, коммунальными службами, общественными автобусными компаниями. Зарядка автопарка происходит в рабочей среде для ЭМ, принадлежащих компании. Эти ЭМ будут доступны для услуг V2G в нерабочее время. Некоторые типы автопарков могут иметь большие преимущества в области V2G, чем другие. Например, парк школьных автобусов с электроприводом может обеспечить значительную доступность накопленной энергии, которая накопится в нерабочее время. Поскольку эти автобусы имеют большие блоки батарей, эксплуатируются на известных маршрутах в будний день, а затем припаркованы на ночь и в выходные дни, потенциал V2G велик.

В настоящее время в коммерческом секторе наблюдается толчок в установке зарядных станций. Тип предприятий, которые будут устанавливать зарядные станции, будет варьироваться, а версия установленного оборудования ЭМ будет отличаться. Станции зарядки Mode 3 могут быть установлены в местах, где владельцы ЭМ будут оставаться достаточно времени, чтобы позволить аккумуляторам зарядиться. Эти места могут включать рестораны, театры, торговые центры, больницы, адвокатские конторы и стоматологические кабинеты. Зарядка постоянного тока Mode 4 может использоваться в таких местах,

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

как рестораны, кафе, магазины и бензоколонки, поскольку клиенты получат значительный заряд за считанные минуты. Также быстрые зарядные устройства постоянного тока можно использовать на магистралях между большими городами.

Есть много вопросов реализации, которые должны быть решены, прежде чем системы V2G могут быть широко приняты. Примерами являются бизнес-процессы, публичная политика и стандартные домены.

Участниками в ускорении процесса интеграции ЭМ в энергосистему являются:

Электроэнергетические компании: они имеют некоторые барьеры по внедрению V2G. В качестве новой технологии барьерами V2G являются требования к совместимости, развивающиеся стандарты, влияние на срок службы батареи ЭМ и требования к задержке компьютерной сети. Нетехнологическими барьерами являются отсутствие инвестиционного капитала, ответственность и подотчетность за надежность сетей и отсутствие определенности в рыночных ценах.

Производители транспортных средств: крупные инвестиции были сделаны в исследования, разработки и производство ЭМ. Однако V2G вызывает неопределенность, связанную со временем автономной работы и емкостью аккумуляторов. Таким образом, демонстрационные испытания и экономический анализ необходимы для доказательства концепции и определения того, имеет ли она смысл для производителей и поставщиков батарей. Производители ЭМ не желают разрешать разряд энергии от батарей с помощью какого-либо контроля, кроме системы управления ЭМ. Это связано с тем, что открытие ЭМ для внешних интерфейсов управления, таких как сигналы цен или регулирования от коммунальных служб или накопителей, может вызвать дополнительный риск. Производители ЭМ столкнутся с трудностями, поскольку они не могут знать до доставки автомобиля, захочет ли владелец участвовать в операциях V2G или нет. Таким образом, им нужно будет либо предоставить всем автомобилям возможности длительного обслуживания автомобиля с операциями V2G, либо базовые гарантии по другим показателям, таким как количество циклов батареи.

Владельцы ЭМ: они будут мотивированы преимуществами, сбалансированными с рисками. Преимущества включают в себя денежные, экологические и сетевые положительные факторы, которые должны быть взвешены с учетом влияния срока службы батареи, наличия транспортного средства и простоты использования. Владельцы ЭМ должны знать, как часто и сколько им будут платить.

Правительство: из-за неопределенности нового рынка электротранспорта необходима четкая политика директив, стандартов и поддержки рынка.

Если батареи ЭМ напрямую подключить к шине постоянного тока, то ток заряда и разряда необходимо будет контролировать. Поэтому между шиной постоянного тока и аккумулятором необходимо ставить двунаправленный преобразователь для регулирования тока заряда и разряда [8]. Пример топологии для системы V2G показан на рис. 2.

Двунаправленное зарядное устройство является интерфейсом между сетью и электромобилем; оно имеет две ступени: сетевой инвертор и повышающий или понижающий преобразователь постоянного тока. Это двунаправленное зарядное устройство может выполнять две основные функции: режим зарядного устройства и V2G (рис. 3) [9].

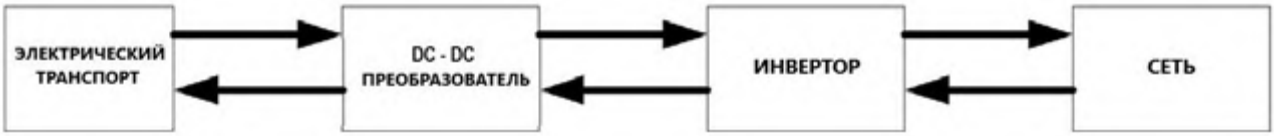


Рис. 2. Блок-схема технологии V2G

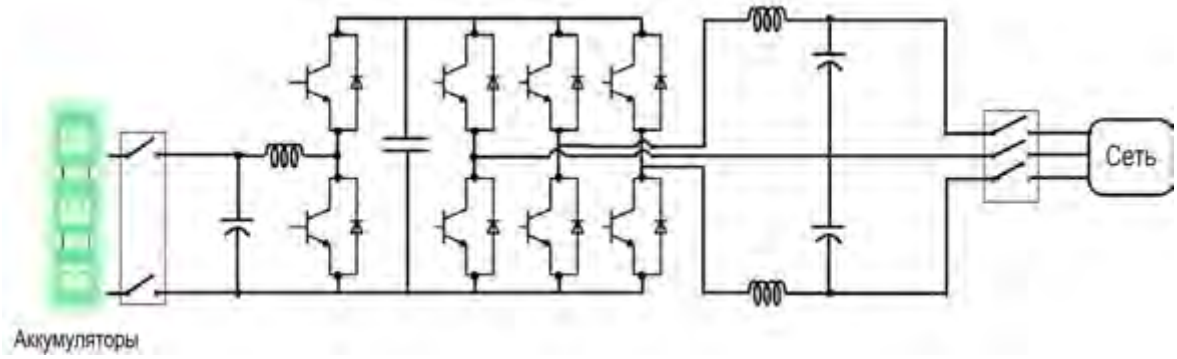


Рис. 3. Топология двунаправленного зарядного устройства

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Выводы

В результате исследования для концепции vehicle-to-grid были выделены следующие преимущества:

– выравнивание пиковой нагрузки: V2G помогает обеспечить питание сети, когда спрос высок, и заряжает батареи ЭМ ночью, когда спрос низкий;

– финансовые: владельцы ЭМ могут получить финансовую выгоду от V2G;

– для хранения возобновляемой энергии: ЭМ может помочь развитию возобновляемых источников энергии. ЭМ может хранить избыточную энергию в ветреные или солнечные периоды. Позже ЭМ может возвратить энергию назад в сеть, когда потребность высока. Таким образом, ЭМ может стабилизировать и сгладить прерывистость возобновляемой энергии;

– поддержка во время отключения электроэнергии: V2G, как ожидается, будет иметь жизненно важную роль во время отключения электроэнергии.

Однако стоит отметить, что данная концепция имеет следующие недостатки:

– капитальные и энергетические затраты на силовую электронику: для подключения ЭМ к электросети требуется двунаправленный интерфейс;

– время работы от батарей: батареи ЭМ имеют жизнь 1000 циклов. Частая зарядка и разрядка сократят время работы батарей. Следовательно, каждый владелец ЭМ должен продавать накопленную энергию обратно в сеть, когда спрос достаточно высок, чтобы вернуть стоимость;

– сложность моделирования: концепция V2G по-прежнему является текущим исследованием, поскольку большинство проектов и схем управления, предложенных учеными, слишком сложны для реализации. Еще больше исследований требуется для снижения сложности и стоимости совместимости V2G на ЭМ;

– рынок: он используется для покупки электроэнергии у владельцев ЭМ. Необходимо быть уверенным, что коммунальные службы собираются получить эти объемы энергии, ведь вся мощность от ЭМ будет передаваться в электроэнергетические компании.

Ученые должны провести достаточное количество тестирований и оценку для получения вспомогательных данных, которые позволили бы свести к минимуму риски и избавиться от барьеров при принятии V2G. Это является одним из основных препятствий для принятия решений регулирующими органами.

Список литературы

1. Каримов, Д.Р. Проблема хранения энергии в промышленных масштабах за рубежом и в России // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сб. ст. по мат. VIII междунар. студ. науч.-практ. конф. 07.02.2013, г. Новосибирск. – №8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://sibac.info /archive/technic/8.pdf
2. Gabbar, H. Smart Energy Grid Engineering / H. Gabbar // IEEE Trans Ind Appl – British Columbia, Canada: Academic Press, 2016. – 568 p.
3. Salameh, Z. Economics of Vehicle to Grid (V2G) Technology / Z. Salameh, Z. Tenglong // International Journal of Engineering Research&Technology (IJERT). – 2014. – Iss.4. Vol.3. – P. 67.
4. Chau, K.T. Electric Vehicle Machines and Drives – Design, Analysis and Application. – Wiley-IEEE Press, 2015. – 375 p.
5. Анучин, А.С. Разработка цифровых систем эффективного управления комплектов тягового электрооборудования гибридных электрических транспортных средств: дис… канд. техн. наук: 05.09.03 / Анучин Алексей Сергеевич. – Москва, 2018. – 445 с.
6. University of Delaware. Electric & hybrid cars [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.udel.edu/V2G/docs/LetendDenLil-LoadOrResource06.pdf
7. Society of Automotive Engineers (SAE), J1772: Electric vehicle and plug in hybrid electric vehicle conductive charge coupler [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://standards.sae.org/j1772_201001
8. Jin, K. Three-level bidirectional converter for fuel-cell/battery hybrid power system / K. Jin [et al.] // IEEE Trans Ind Electron. – 2010. – No.57(6):1976. – P. 86.
9. Ansean, D. Evaluation of life PO4 batteries for electric vehicle applications / D.Ansean [et al.] // IEEE Trans Ind Appl. – 2015. – No.51(2):1855. – P. 63.

V.I. Kalashnikov /Cand. Sci. (Eng.)/, A.A. Chepiga
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE ANALYSIS OF VEHICLE-TO-GRID CONCEPT

Background. *One of the main obstacles in creating of accumulating systems is the problem of balanc-*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ing of the supplying power to the network, achieved due to renewable sources according to consumer's needs. One of the options to solve this problem is the concept called "vehicle-to-grid" (V2G) which is taking part directly in handling the electrical energy demand and helping to get rid of this issue.

Materials and/or methods. *The problem of accumulating "green" energy is highly relevant in the context of the deterioration of the environmental aspect of the world. The certain developments of international and national theorists and practitioners were used during research.*

Results. *As a result of vehicle-to-grid concept research, the following advantages highlighted.*

– Levelling of the peak workload.

– Economic: the EV owners can receive a financial reward from V2G.

– EV can help to develop renewable sources of energy in order to make it possible to save the renewable energy.

– During the power cuts, the V2G support is expected to play a life-saving role.

However, certain disadvantages of this concept are noteworthy:

– Financial and energetic costs of electronics.

– The time of battery work: EV batteries have 1000 cycles charge. Pure recharge and discharge may reduce battery work.

– The complexity of modelling: V2G concept is still under research because most projects and management schemes which are offered by scientists are quite complex to be realized.

– Buying electricity from EV owners at the market.

Conclusion. *Sufficient testing and evaluation required by the industry and academia to provide supporting data that would minimize risks and mitigate the barriers in the adoption of the V2G.*

Keywords: *vehicle-to-grid, batteries, electric vehicles, energy storage.*

Сведения об авторах

В.И. Калашников
SPIN-код: 8002-9286
Author ID: 855701
ORCID iD: 0000-0001-5116-1486
Телефон: +380 (62) 304-71-31
+380 (71) 334-92-91
Эл. почта: viktor_kalashnikov@donntu.org

А.А. Чепига
Телефон: +380 (71) 395-11-40
Эл. почта: andreychepiga@yandex.ua

Статья поступила 24.05.2019 г.
© В.И. Калашников, А.А. Чепига, 2019
Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 622.647.1

И.В. Ковалёва /к.т.н./, О.К. Маренич
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ТОКООГРАНИЧЕНИЕ ЦЕПИ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ КАК ИННОВАЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ В ОБЛАСТИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ШАХТНОЙ УЧАСТКОВОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

На основании исследования модели коммутационного переходного процесса в силовой цепи шахтной участковой трансформаторной подстанции установлены параметры токоограничения при отключении междуфазного короткого замыкания в отходящем присоединении при условии примененния полдупроводниково-резистивного устройства коммутации трехфазной цепи вторичных обмоток трансформатора.

Ключевые слова: *электротехнический комплекс, трансформаторная подстанция, автоматический выключатель, короткое замыкание, электрическая дуга, ресурс, ускоренное обесточивание, схема, модель, анализ.*

Постановка проблемы

Междуфазные короткие замыкания (КЗ) в промышленных электросетях переменного тока представляют наивысшую опасность воспламенения электрооборудования. В еще большей степени опасность проявляется при эксплуатации шахтных участковых электросетей, поскольку в условиях шахты постоянно присутствует фактор вероятного взрыва метановоздушной смеси. В этой связи в составе схем силовых коммутационных аппаратов применяют устройства максимальной токовой защиты как непосредственного (максимальные расцепители), так и пропорционального (полупроводниковые устройства максимальной токовой защиты) измерения тока защищаемого силового присоединения. В качестве исполнительного коммутационного устройства в этом случае выступает автоматический выключатель комплектной участковой трансформаторной подстанции, а также аналогичный групповой автоматический выключатель распределительного пункта участка.

Современная тенденция повышения мощности электромеханических установок технологического участка шахты неизбежно ведет к необходимости перехода на более высокие уровни номинального напряжения электропитания. С учетом реализации переключения отечественных промышленных электросетей со схемы «звезда» на схему «треугольник» (и наоборот) речь идет о применении для электропитания технологических участков шахт как линейного напряжения 660 В (фазное – 380 В), так и линейного напряжения 1140 В (фазное – 660 В). Особенность такого технического решения состоит в том, что напряжение 1140 В, формально относящееся к классу высоких напряжений, лишь ненамного превышает минимальный уровень напряжений этого класса (1000 В).

Экономически обоснованным решением стало применение в шахтных электрических сетях линейного напряжения 1140 В низковольтного автоматического выключателя А37ХХ при условии его адаптации (аппарат типа А3792У). Однако практикой его эксплуатации выявлены повторяющиеся эффекты электродугового повреждения его силовых коммутационных элементов (междуфазный пробой) в процессе подачи напряжения на отходящее присоединение при условии, что предшествующим был процесс защитного отключения междуфазного короткого замыкания.

В этом случае имеет место не только невосстанавливаемое повреждение автоматического выключателя, но и общее снижение ресурса шахтной участковой трансформаторной подстанции.

Этим определяется целесообразность поиска технических решений в области автоматического ограничения энергетических параметров в процессе отключения короткого замыкания в присоединении трансформаторной подстанции и обосновании их приемлемых эксплуатационных характеристик.

Анализ последних исследований и публикаций

На основании исследования конструкции автоматического выключателя А3792У, выпол-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

нявшего многократные отключения токовой перегрузки в сети линейного напряжения 1140 В, выявлены ее элементы, способствующие созданию омеднения поверхности диэлектриков в результате воздействия плазменно-ионизационных процессов, обусловленных коммутационной дугой высокой мощности [1]. Соответствующие мощностные показатели дугообразования относятся к случаю отключения автоматическим выключателем междуфазного короткого замыкания, образовавшегося в непосредственной близости от выходных силовых контактов трансформатора шахтной участковой подстанции высокой мощности (630 кВА и более) при величине линейного напряжения сети 1140 В.

Процесс КЗ в известных исследованиях представлен как результат действия совокупности встречно направленных энергетических потоков со стороны питающей трансформаторной подстанции и асинхронных двигателей потребителей [2,3]. При этом детально рассмотрены свойства этого процесса как переходного. Технические средства максимальной токовой защиты представлены разработками, действие которых основано на сравнении тока защищаемой сети или пропорционального параметра с параметром уставки срабатывания. Однако действие токовой защиты не сопровождается токоограничением сети и отличается наличием временной задержки, связанной с длительностью выявления аварийного процесса и длительностью разъединения силовой группы контактов исполнительного коммутационного аппарата.

Исследования в области теории электрической дуги [4] подтверждают, что ее энергетика определяется как величиной электрического тока в канале дугообразования (в данном случае – в области разъединения контактов автоматического выключателя), так и продолжительностью процесса дугообразования. Таким образом, научную и практическую актуальность представляют исследования процессов токоограничения цепи отключения тока короткого замыкания на основе применения дополнительного узла ускоренной коммутации вторичных обмоток трансформатора участковой подстанции. В частности, такой узел может быть создан на основе применения плавких предохранителей.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является установление обоснованности допущения о корректности применения дополнительного устройства ускоренного разъединения трехфазной схемы вторичной обмотки трансформатора участковой подстанции, функционирующего на основе эффекта плавкого предохранителя, в контексте решения задачи повышения ресурса подстанции и ее силовых коммутационных компонентов.

Для достижения этой цели должна быть решена задача обоснования структуры токоограничивающего устройства и исследования модели процесса токоограничения коммутации цепи короткого замыкания.

Основной материал исследования

Характер протекания переходных процессов в силовом присоединении участковой трансформаторной подстанции при возникновении короткого замыкания на ее выходе или в кабеле на близком расстоянии от выхода может быть установлен исследованием расчетной схемы (рис. 1), содержащей одно силовое присоединение.

Параметрами и компонентами схемы являются: e_A, e_B, e_C – мгновенные значения фазного напряжения на выходе трансформаторной подстанции; R_{mp}, L_{mp} – активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки трансформатора; *АВ* – автоматический выключатель; *КМ* – контактор магнитного пускателя; $R_{к1}$, $L_{к1}$ – активное сопротивление и индуктивность первого условного участка гибкого кабеля; $R_{к2}$, $L_{к2}$ – то же для второго условного участка гибкого кабеля; i_A, i_B, i_C – мгновенные значения токов сети; R_s, L_{sl} – сопротивления асинхронного двигателя (АД) потребителя, представленные соответственно активным сопротивлением и индуктивностью статора.

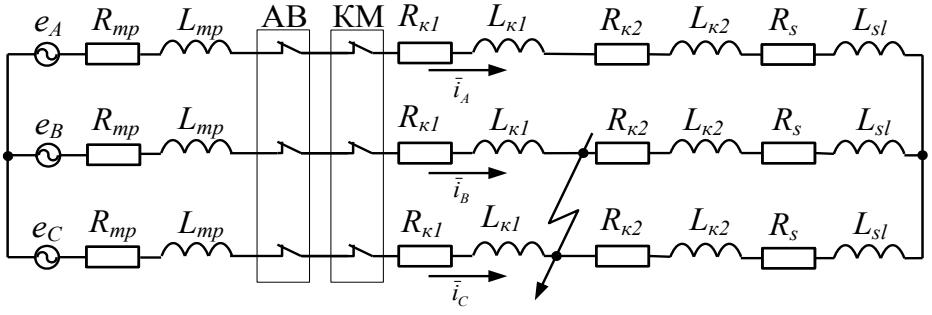


Рис. 1. Схема исследования короткого замыкания на выходе трансформаторной подстанции

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В силу незначительной длины магистрального кабеля его параметрами пренебрегаем.

В процессе исследований представляется корректным ввести следующие допущения:

– короткое замыкание возникает в гибком кабеле, присоединенном к выходу трансформаторной подстанции в диапазоне расстояний от нуля до половины длины кабеля;

– защитное отключение сети выполняется автоматическим выключателем через 0,1 с после возникновения аварийного состояния;

– в качестве аварийного состояния принимаем наиболее распространенный режим двухфазного короткого замыкания;

– исследование производится в отношении шахтной участковой электрической сети номинального линейного напряжения 660 В; 1140 В частоты 50 Гц;

– в исследуемой шахтной участковой электросети могут быть задействованы комплектные трансформаторные подстанции серии КТПВ мощностью 400 кВА, 630 кВА и 1000 кВА; гибкий экранированный кабель марки КГЭШ длиной 200 м и сечением силовых жил 70 мм^2, что относится к наиболее распространенным техническим решениям в области электроснабжения горных технологических машин высокой мощности.

Дифференциальное уравнение, описываающее прооцессы в исследуемой схеме, представлено выражением:

$$\bar{u} = \left(R_{tr} + R_{SA} + R_{MK}\right)\bar{i}_{\Sigma} + \\ + \left(L_{tr} + L_{MK}\right)\frac{d\bar{i}_{\Sigma}}{dt} + \bar{u}_1. \qquad (1)$$

Учитывая, что на выходе трансформатора участковой подстанции формируется симметричное трехфазное напряжение прямой последовательности и постоянной частоты, пространственный вектор напряжения ū определяется выражениями:

$$\bar{u} = u_{\alpha} + ju_{\beta}, \qquad (2)$$

$$u_{\alpha} = U_m \cos(\omega t), \quad u_{\beta} = U_m \sin(\omega t), \qquad (3)$$

где U_m – действующее значение фазной ЭДС, которая индуктируется во вторичной обмотке трансформатора подстанции.

Выражения (1)…(3) представляют собой математическую модель общей части сети, включающей трансформаторную подстанцию с автоматическим выключателем *SA* на выходе распределительного устройства низкого напряжения (подстанции) и магистральный кабель (рис. 2).

Результаты моделирования для отдельных параметров исследуемого объекта в состоянии двухфазного короткого замыкания в отходящем кабеле (рис. 3) характеризуют количественные показатели процесса, в частности, величину тока силового присоединения на выходе трансформатора подстанции.

Полученные величины соответствуют уровню, достаточному для активизации процессов плавления, кипения поверхностей силовых контактов автоматического выключателя при разъединении цепи КЗ, насыщении плазмы дуги парами металла (контактов) и образования расширяющихся областей потоков газа в пред- и наддиафрагменными областями распространения тела дуги (рис. 4) [4].

Принципиально важно учитывать, что процесс двухфазного короткого замыкания в дальнейшем переходит в последующую фазу трехфазного замыкания, что еще больше повышает величины токов короткого замыкания и в еще большей степени обусловливает актуальность защитного токоограничения процесса отключения аварийного присоединения. В настоящее время задача ограничения тока КЗ в шахтных низковольтных сетях не решена, т.к. применение токоограничивающих реакторов ограничивается их значительными габаритами и снижением качества напряжения.

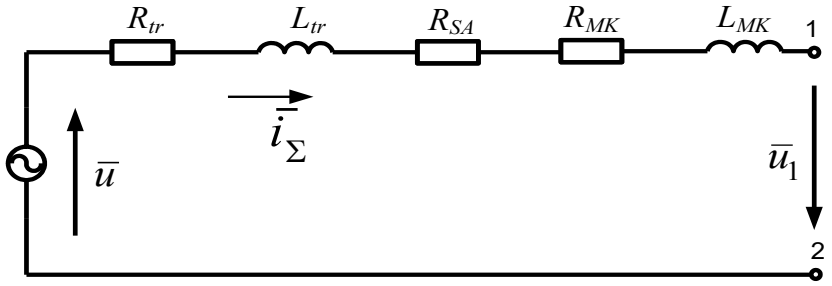
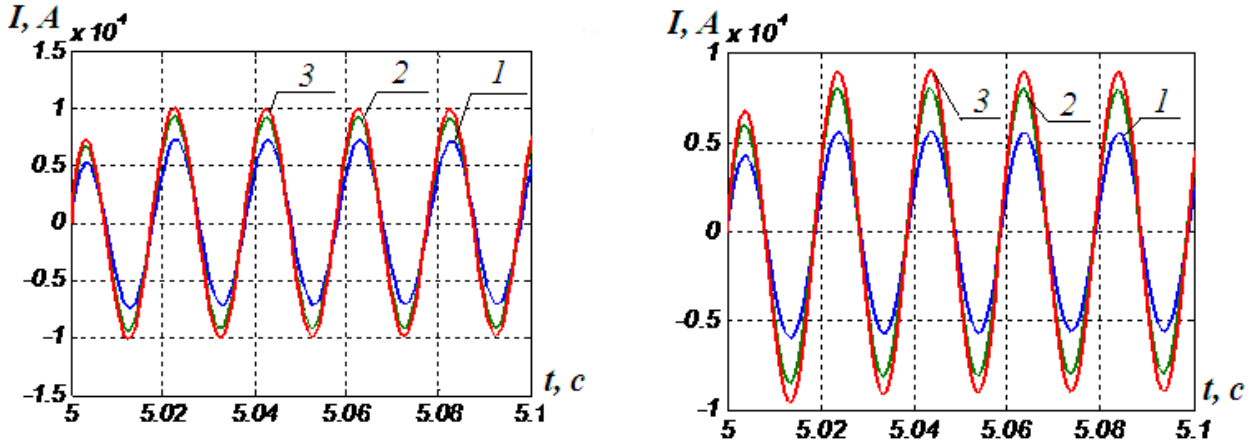


Рис. 2. Схема замещения общей части сети – трансформаторной подстанции с автоматическим выключателем *SA*, на выходе распределительного устройства низкого напряжения, и магистрального кабеля

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 3. Диаграммы величин тока двухфазного короткого замыкания:
а – в сети 660 В; *б* – в сети 1140 В; *1* – КТПВ-400; *2* – КТПВ-630; *3* – КТПВ-1000

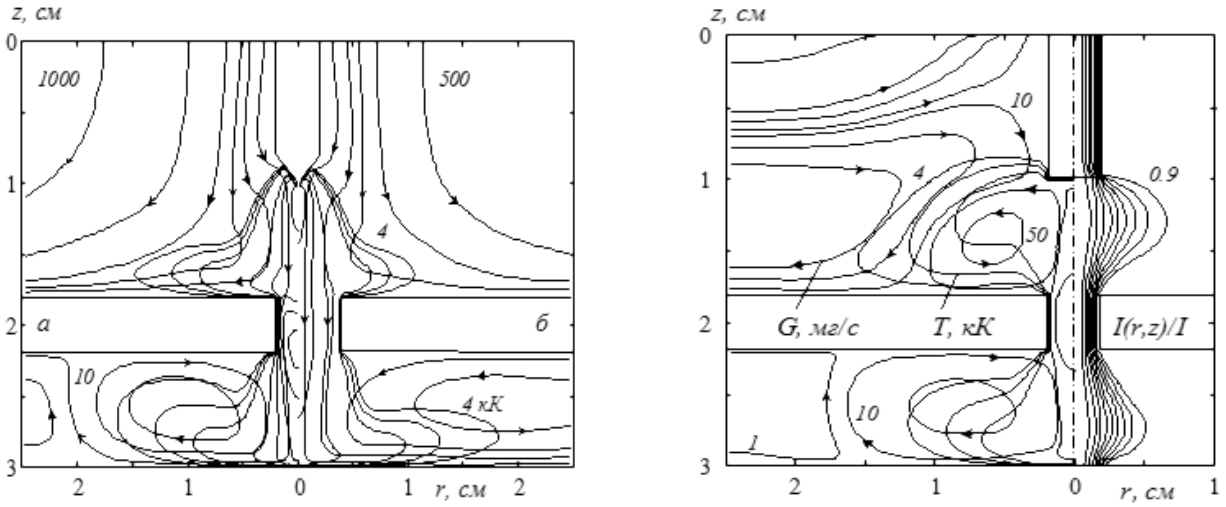


Диаграмма 1 Диаграмма 2

Рис. 4. Распределение линий тока газа, *G*=1, 10, 50, 100, 200, 500, 1000 мг/с, и поля изотерм, жирные линии *T*=4, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35 кК, в дуге *I*=200 А в зависимости от диаметра диафрагмы: *диаграмма 1а* – d=4; *1б* – d=8; распределение линий тока газа, *G*=1, 10, 50, 100, 500 мг/с, поля изотерм, жирные линии *T*=4, 7, 10, 15, 20 кК, и линий электрического тока с шагом 0,1 в дуге с плоским торцом катода, *I*=200 А: *диаграмма 2* – d=4

Простейшим методом ограничения энергетики коммутационного дугообразования является разрыв коммутируемой цепи дополнительным коммутационным устройством ускоренного быстродействия. В качестве технического решения в данном случае представляется приемлемым использовать плавкий предохранитель FU в качестве обобщенной нагрузки силового выпрямителя *VD*1…*VD*6, объединяющего в схему «звезда» обмотки трех фаз вторичной цепи трансформатора *TV* подстанции участка шахты (рис. 5) [5].

Такое применение предохранителя в трехфазной промышленной электросети (предназначенной для питания асинхронных двигателей) допустимо, поскольку предохранитель воздействует одновременно на все фазы и не провоцирует возникновение неполнофазного режима после защитного срабатывания. В электротехнических комплексах повышенной мощности в этом случае могут применяться комплекты параллельно соединенных предохранителей [6].

Действие предлагаемого технического решения заключается в автоматическом увеличении сопротивления схемы соединения в трехфазную систему фаз вторичных обмоток трансформатора трансформаторной подстанции электросети шахтного участка за счет срабатывания плавкого предохранителя *FU* в момент возникновения повышенного тока в контуре выпрямителя *VD1-VD6*. Сопротивление резистора в этом случае может равняться *R*=10 Ом÷∞. Это позволяет выполнить токоограничение в сети при сниженных показателях искрообразования и перенапряжения.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

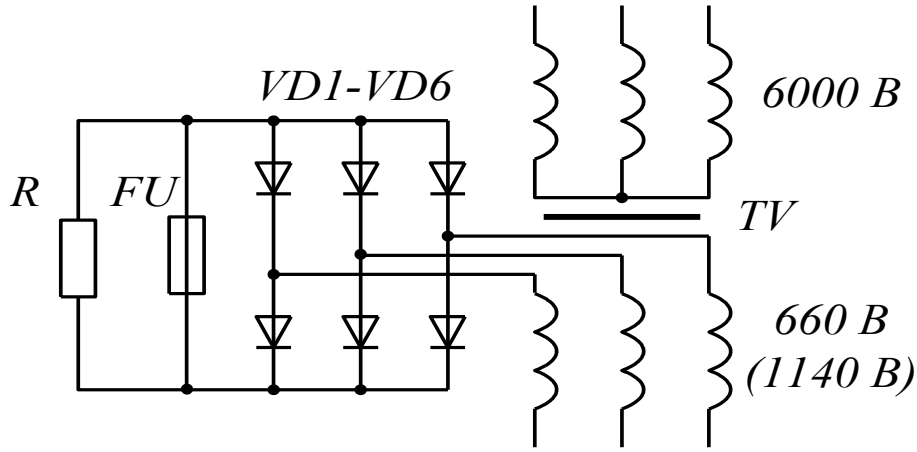
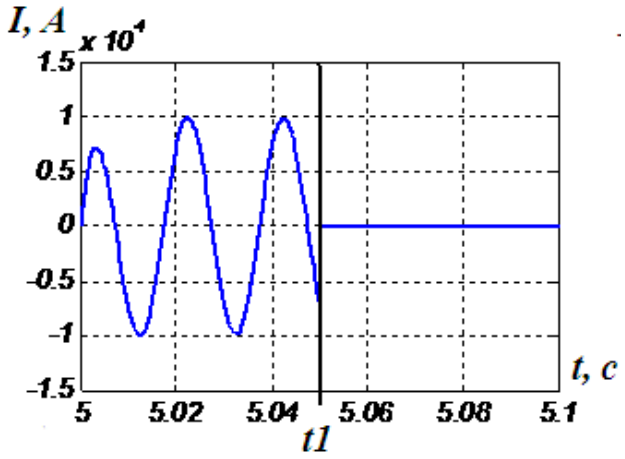


Рис. 5. Трехфазный трансформатор напряжения с устройством токоограничения цепи защитного отключения

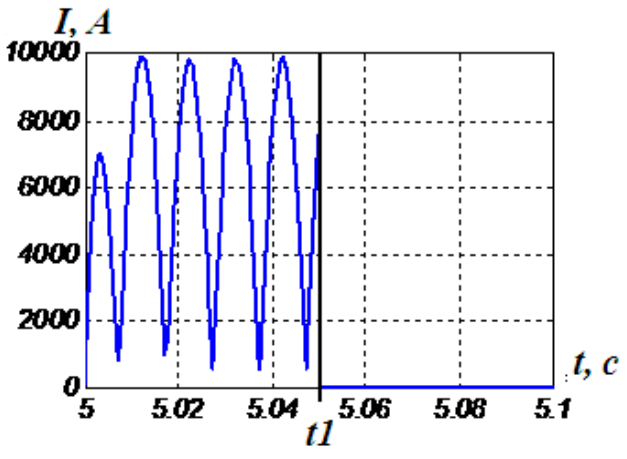
Кроме этого, защитное действие схемы (см. рис. 5) предполагает срабатывание нулевого расцепителя автоматического выключателя трансформаторной подстанции, что повышает надежность защиты.

С целью исследования токоограничивающего эффекта, который обеспечивается предлагаемым техническим решением (см. рис. 5), дополним модель элементами токоограничения и введем допущение, что время срабатывания плавкого предохранителя с учетом величин токов короткого замыкания (см. рис. 3) не превышает 0,05 с. Результаты моделирования представлены на рис. 6, где индексом t_1 обозначены моменты срабатывания плавкого предохранителя.

Результатами исследования установлен токоограничивающий эффект, сопровождающий действие предлагаемого устройства при возникновении короткого замыкания (см. рис. 6а). Однако в момент срабатывания плавкого предохранителя возникают значительные перенапряжения в элементах электрооборудования, поэтому с целью предупреждения такого негативного эффекта параллельно плавкому предохранителю целесообразно подключить дополнительный резистор. Результаты моделирования с момента срабатывания плавкого предохранителя с учетом дополнительного резистора R=50 Ом представлены на рис. 7 и свидетельствуют о наличии эффекта снижения энергетических показателей процесса отключения цепи короткого замыкания автоматическим выключателем шахтной участковой трансформаторной подстанции. Это подтверждает целесообразность применения автоматического токоограничивающего устройства цепи отключения аварийного тока в качестве технического решения в контексте повышения ресурса подстанции и, в частности, силовых коммутационных элементов ее функционального узла – автоматического выключателя распределительного устройства низкого напряжения.



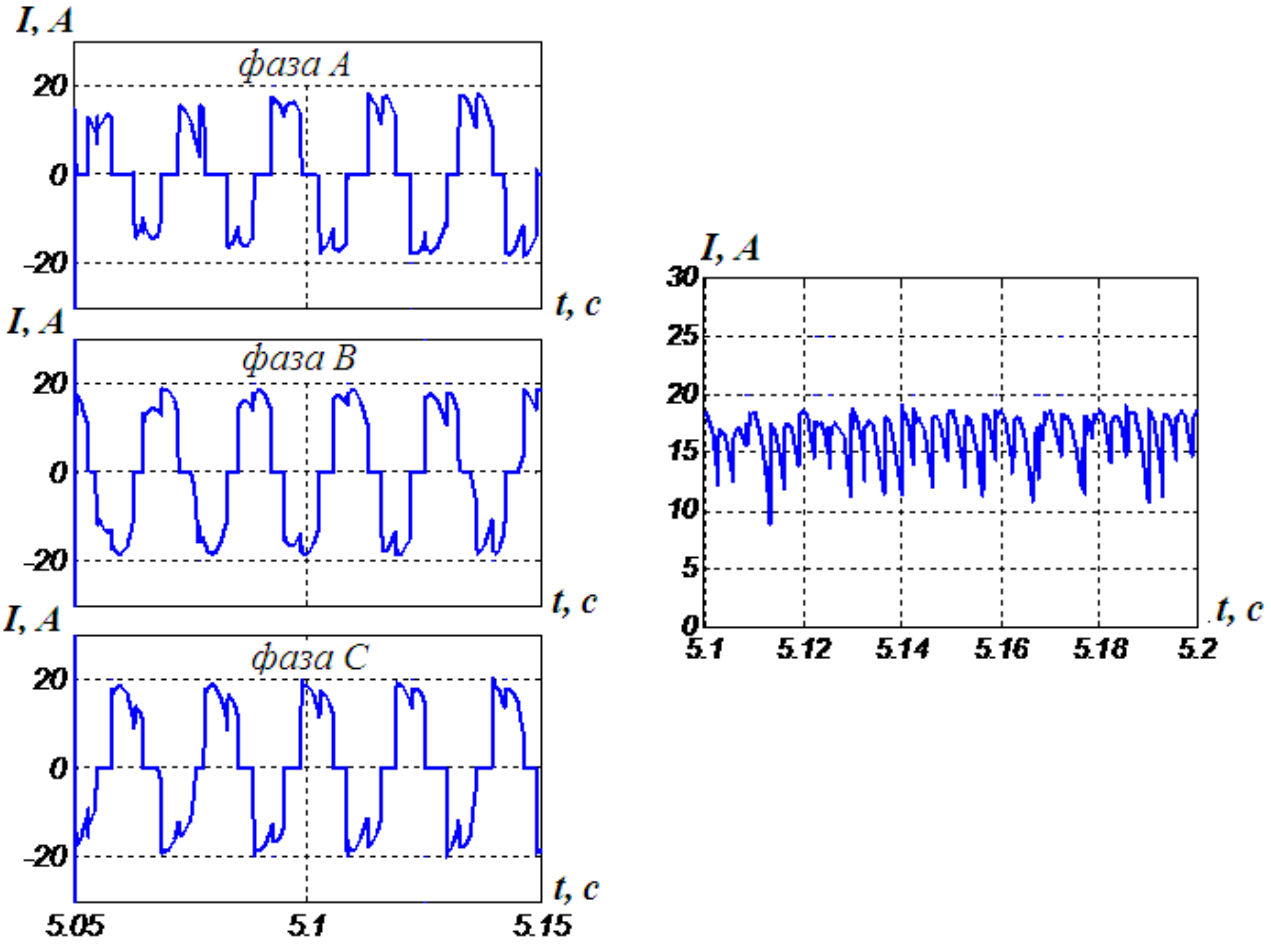
а



б

Рис. 6. Диаграммы величины тока двухфазного короткого замыкания в сети 660 В, КТПВ-1000:
а – с учетом токоограничивающего эффекта плавкого предохранителя;
б – величины тока на выходе выпрямителя *VD1-VD6*, $R=\infty$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 7. Расчетные диаграммы фазных токов присоединения с цепью двухфазного КЗ при токоограничении резистором R=50 Ом нагрузки выпрямителя с учетом влияния: *а* – обратных ЭДС АД; *б* – величины тока на выходе выпрямителя U=660 В

Выводы

Исследованиями установлены возможность и целесообразность применения дополнительного устройства ускоренного разъединения трехфазной схемы вторичной обмотки трансформатора участковой подстанции, функционирующего на основе эффекта плавкого предохранителя, в контексте решения задачи повышения ресурса подстанции и ее силовых коммутационных компонентов. Предложенная схема устройства ограничения тока в цепи отключения короткого замыкания в присоединении трансфоорматорной подстанции участка шахты функционирует в автоматическом режиме и, в зависимости от комплектации, позволяет ограничивать продолжительность тока в цепи защитного отключения либо ограничивать его величину (после срабатывания предохранителя схемы). Такое техническое решение обеспечивает безаварийную эксплуатацию низковольтного автоматического выключателя А3792У в составе распределительного устройства низкого напряжения шахтной участковой трансформаторной подстанции при величине линейного напряжения сети 1140 В, что обеспечивает приемлемые технические и экономические условия применения указанного уровня напряжения в электросети участка шахты.

Направлением дальнейших исследований является установление предельных временных параметров срабатывания устройства ускоренного разъединения трехфазной схемы вторичной обмотки трансформатора участковой подстанции.

Список литературы

1. Маренич, О.К. Элементы конструкции автоматического выключателя А37ХХ как фактор возникновения его потенциально опасного состояния / О.К. Маренич, И.В. Ковалѐва // Вестник ДонНТУ. – 2018. – №4. – С. 47-52.
2. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для вузів / Г.Г Півняк [та ін.]; під ред. Г.Г. Півняка. – 2-е вид., доправ. та доп. – Дніпропетровськ: НГУ, 2002. – 579 с.
3. Ковальова, І.В. Дослідження процесу фор-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

мування зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна при короткому замиканні в живлячому кабелі з урахуванням впливу параметрів електротехнічного комплексу // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 20(182). – С. 35-39.
4. Лелѐвкин, В.М. Численное моделирование характеристик открытой диафрагмированной электрической дуги / В.М. Лелѐвкин, В.Ф. Семѐнов // Вестник КРСУ. – Бишкек: КРСУ, 2002. – №2. – С.25-34.
5. Патент на изобретение 102285 (UA), МПК (2013.01) H02H 3/00. Трифазний трансформатор напруги / К.М. Маренич, І.В. Ковальова, О.К. Маренич. – a 2011 09048, заявл. 19.07.2011; опубл. 25.06.2013; бюл. №12.
6. Намитоков, К.К. Плавкие предохранители / К.К. Намитоков [и др.]. – М.: Энергия, 1979. – 176 с.

I.V. Kovaljova /Cand. Sci. (Eng.)/, **O.K. Marenich**
Donetsk National Technical Univercity (Donetsk)

LIMITATION OF ELECTRIC CURRENT IN PROTECTIVE DISCONNECTING DEVICE AS INNOVATIVE DECISION FOR INCREASE OF LIFE OF MINE SECTION TRANSFORMER SUBSTATION

Background. *The automatic power switch A3782 is a reliable device in the mine section electrotechnical complex with voltage 660 V. Its use in a network with voltage 1140 V is also expedient. However, there are cases when, after turning off ultrahigh short-circuit currents, conduction between phases occurs inside the circuit breaker, which leads to damage. It is important to develop a device to limit the current in the power circuit of the circuit breaker during the turning off ultrahigh short-circuit currents. This technical solution is innovation and allows increasing the life of the electrical power equipment of the mine section.*
Materials and/or methods. *Based on mathematical modelling and the use of the theory of electric arc, the possibility of formation of powerful ionisation processes in an automatic switch when the short-circuit current is disconnected in the electric network of high power with a voltage of 1140 V established. The structure of the current limiting device during the protective shutdown justified. Through modelling, the efficiency of the developed device confirmed.*
Results. *The device for limiting the current in the power circuit of the circuit breaker in the process of switching off the short circuit designed. Studies have confirmed the feasibility of its use and the possibility of increasing the life of the circuit breaker of the transformer substation of the mine section.*
Conclusion. *The resource of circuit A3792 breaker of mine section transformer substation can be upgraded. The use of this switch in the electrical network with a voltage of 1140 V is provided when using a device for limiting the current of the short circuit disconnection, the scheme of which is based on the rupture of the three-phase connection of the secondary windings of the transformer with a fuse. The results of the study confirmed the feasibility of this technical solution.*

Keywords: *electrical engineering complex, transformer substation, circuit breaker, short circuit, voltaic arc, resource, accelerated de-energisation, chart, model, analysis.*

Сведения об авторах

И.В. Ковалёва
SPIN-код: 5187-2555
Телефон: +380 (71) 334-91-00
Эл. почта: visara85@mail.ru

О.К. Маренич
Телефон: +380 (71) 317-32-09
Эл. почта: marenich13@gmail.com

Статья поступила 13.05.2019 г.
© И.В. Ковалѐва, О.К. Маренич, 2019
Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский

УДК 621.771.2

В.Г. Артюх /д.т.н./, Н.В. Чернышева /к.т.н./, Е.Л. Яковлева /к.т.н./
ГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (Санкт-Петербург)
А.А. Никитченко
Научно-исследовательский центр транспортных технологий (Санкт-Петербург)
В.О. Мазур
ООО «Научно-производственное объединение «Санкт-Петербургская Электротехническая Компания» (Санкт-Петербург)

ИСПЫТАНИЯ МОДЕЛЕЙ УПРУГИХ ВАЛОВ-ЭНЕРГОАККУМУЛЯТОРОВ ПРИВОДОВ НЕПРЕРЫВНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ

Показана возможность создания активного устройства (вала-энергоаккумулятора с упругим элементом из конструкционного полиуретана), которое может быть установлено в главной линии привода прокатной клети. Определены необходимые механические характеристики полиуретановых эластомеров для упругого элемента вала-энергоаккумулятора. Разработаны необходимые испытательные установки для нестандартных испытаний упругих элементов. Разработаны варианты конструкций упругого вала-энергоаккумулятора.

Ключевые слова: *непрерывные широкополосные станы (НШС), энергоемкость, амортизация, упругие валы и муфты, эластомеры и полимеры, вал-энергоаккумулятор.*

Постановка проблемы

Непрерывные широкополосные станы (НШС) отличаются очень высокой динамичностью и аварийностью [1…8]. В процессе эксплуатации разрушаются валки, шпиндели, подшипники, наделки подушек и станин. Основной причиной такого положения является высокая жесткость указанного оборудования и низкая его энергоемкость [9…11]. В этих условиях появляются паразитные нагрузки (например, горизонтальная сила, действующая на рабочие валки и главную линию стана) [12…15].

Наличие горизонтальной силы приводит к тому, что крутящие моменты в главной линии возрастают при захвате раската в 3…4 раза со всеми отрицательными последствиями [16]. Одним из вариантов амортизации возникающих паразитных нагрузок является разработка и установка в главных линиях НШС специальных активных устройств. По принципу действия такие устройства должны обладать свойствами буферов и демпферов, то есть обладать большими энергоемкостью и рассеянием энергии (внутренним трением). Первое качество необходимо для «срезания» пиков нагрузок – как правило, первого пика. Второе – для демпфирования возникающего колебательного процесса. Основным требованием к подобному устройству является максимально возможная энергоемкость при умеренной нагрузке. Подобные устройства логично называть энергоаккумуляторами.

Попытки ликвидировать или хотя бы существенно уменьшить горизонтальные силы, которые неоднократно предпринимались в различных цехах меткомбинатов стран СНГ, ощутимого результата не принесли [17,18]. Одной из причин этого было то, что не удавалось разработать активные энергоемкие устройства для клетей и главных линий. Это возможно сделать только с применением энергоемких низкомодульных полимерных (эластомерных) материалов [10].

Анализ последних исследований и публикаций

Состояние дел с внедрением эластомерных материалов нельзя признать удовлетворительным. Объем их внедрения (и, соответственно, экономический эффект) мог бы быть существенно больше. Основной причиной этого следует считать недостаток знаний об основных механических характеристиках этих материалов. С другой стороны, производители полимеров являются специалистами-технологами и имеют недостаточное представление о требуемых для практики эксплуатации полимерных деталей механических характеристиках производимых ими полимеров.

Для активных деталей, являющихся упругими элементами (УЭ) буферов, упругих валов и муфт, наиболее существенной характеристикой является их энергоемкость (запас потенци-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

альной энергии упругой деформации). Энергоемкость детали в значительной мере зависит от удельной энергоемкости ее материала. Между тем, такой характеристики не приводит ни один производитель полимеров, что говорит об ограниченном понимании требований к материалам. Другая группа активных деталей представляет собой компенсаторы, ограничивающие паразитные нагрузки при значительных деформациях узлов, вызванных несоосностями, перекосами и другими деформациями, связанными с повышенным износом и погрешностями монтажа. Для таких деталей важно знать максимально допустимую упругую деформацию как при растяжении, так и при сжатии. Сведения об этой характеристике также отсутствуют во многих рекламных проспектах фирм – производителей полимеров.

Эластомеры и полимеры обладают рядом особенностей, влияющих на их нагруженность и долговечность. К таким особенностям можно отнести малую сжимаемость. У этих материалов объемный модуль упругости в десятки раз больше, чем модуль Юнга при сжатии и растяжении. Одним из следствий этого свойства является то, что такие материалы можно использовать как передающую среду и создавать конструкции, близкие к гидравлическим [19,20]. Таким образом работают эластомеры в усилителях, редукторах, домкратах, съемниках, некоторых типах предохранителей и амортизаторов. Полимерные и эластомерные пластины малой толщины работают в аналогичных условиях, если они сжаты в направлении наименьшего размера. Для этих эластомеров важна сжимаемость в замкнутом объеме, отражаемая объемным модулем упругости. Эта характеристика также отсутствует в большинстве рекламных проспектов и заводских нормалях. Ее можно было бы рассчитать, если бы кроме нормальных модулей упругости приводились значения коэффициентов Пуассона, однако и эти сведения в проспектах отсутствуют.

Недостаточно исследованы также реологические явления, протекающие в полимерах при обычных температурах, то есть ползучесть и релаксация напряжений [21,22]. Известны попытки применить полиуретановые амортизаторы в системе уравновешивания шпинделей блюмингов и слябингов. Некоторые из этих попыток оказались неудачными из-за быстро развивающихся деформаций ползучести. В амортизаторах станинных роликов и роликов рольгангов работают предварительно напряженные полиуретановые упругие элементы, усилия предварительной затяжки которых постоянно релаксируют во времени. В приведенных случаях применения эластомеров нужно знать параметры ползучести и релаксации, которые также отсутствуют в проспектах.

Еще одна характеристика полимеров, связанная с внутренним трением, – коэффициент рассеяния энергии. Эта величина для полимеров на несколько порядков больше, чем для металлов. Так, для многих марок литьевых конструкционных полиуретанов рассеяние энергии за один цикл составляет ψ=0,45…0,55 [23]. Нелишним будет знать коэффициент трения скольжения полимера по стали, адгезионные свойства по отношению к сталям [24,25]. В ряде случаев нужно знать максимально допустимые упругие деформации, а также максимальные деформации до разрушения.

В рассмотренных примерах применения полимеров и эластомеров отсутствие необходимых механических характеристик существенно затрудняет выбор конкретной марки полимера и рабочее проектирование устройств. Так, для амортизаторов и буферов нужны материалы с максимальной энергоемкостью, для демпферов – с максимальным внутренним трением, для компенсаторов – с максимальными упругими деформациями. Для усилителей, редукторов, съемников, домкратов, упругих шарниров нужны материалы малосжимаемые с максимальным значением объемного модуля упругости. Для подшипников и подпятников – с минимальным и стабильным коэффициентом трения и высокой износостойкостью. Для упругих муфт и валов-энергоаккумуляторов – с хорошими адгезионными свойствами по отношению к сталям и высокой энергоемкостью.

Подобрать такой материал по рекламным проспектам, издаваемым фирмами-изготовителями, практически невозможно.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является показать возможность создания активного устройства (вала-энергоаккумулятора с упругим элементом из конструкционного полиуретана), которое может быть установлено в главной линии привода прокатной клети. Основные задачи: определение необходимых механических характеристик полиуретановых эластомеров для упругого элемента вала-энергоаккумулятора; создание необходимых испытательных установок для нестандартных испытаний упругих элементов (кручение, усталостная прочность, натяг); проработка вариантов конструкций упругого вала-энергоаккумулятора (упругого шпинделя) для приводов черновых клетей НШС.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Основной материал исследования

Основная деталь упругого вала представляет собой буферное устройство. Материал этой детали должен обладать максимально возможной энергоемкостью. Кроме того, проектируемый вал должен также иметь свойства демпфера (для гашения колебаний, возникающих в момент захвата). Поэтому желательно, чтобы материал УЭ имел большое внутреннее трение. Адгезия полимеров и эластомеров к стали определяет возможность создания таких эффективных устройств, как компактные упругие муфты, компенсаторы, демпферные и буферные устройства и т.д. [25,26]. Ряд термопластичных полимеров обнаруживают значитьно большую адгезию к стали (при соответствующем нагреве), чем при использовании специальных клеевых композиций.

Анализ характеристик конструкционных материалов [21,23,25,27,28] показал, что наиболее подходящим материалом для упругого вала следует считать конструкционный полиуретан отечественного производства СКУ-ПФЛ-100; возможно также применение полиуретанов группы adiprene (например, adiprene L 167). Внутреннее трение этого полиуретана достаточно велико для эффективного демпфирования. Коэффициент рассеяния энергии составляет ψ=50 %. Технология изготовления крупных деталей из этого материала достаточно проста – свободное литье в металлическую форму. Кроме того, данный материал может быть приклеен к стальной арматуре, как холодным, так и горячим способом.

Вопрос об энергоемкости активных деталей рассматривался в работе [27], в которой была предложена формула:

$$U = \alpha \frac{\sigma_*^2}{E} \cdot V ,$$

где V – объем упругого элемента; E – нормальный модуль упругости материала; σ_* – предельное напряжение для материала УЭ; α – коэффициент качества напряженного состояния упругого элемента.

Задача выбора УЭ с оптимальными параметрами может быть разделена на две части:

– выбор материала УЭ;

– выбор формы УЭ и схемы его нагружения.

Анализ материалов по удельной энергоемкости показывает, что наиболее энергоемкими материалами (по параметру σ_*^2 / E) являются полиуретановые эластомеры и пружинные стали, причем пружинные стали совершенствовались по этому параметру десятки лет, в то время как энергоемкость для полиуретанов вообще фирмами-изготовителями не определяется.

Второй параметр – α отражает качество напряженного состояния УЭ. Чем равномернее распределены напряжения в УЭ, тем выше качество и больше коэффициент α. Для одноосного напряженного состояния α=0,5. Получить такое значение коэффициента α для стальных УЭ практически невозможно, так как для стали деформации растяжения и сжатия являются очень жесткими, а приемлемые по жесткости деформации – изгиб и кручение – не обеспечивают равномерного распределения напряжений.

Для эластомеров, напротив, наиболее подходящими деформациями для упругих элементов являются сжатие, сдвиг, кручение валов в виде толстостенных труб. Первая из названных деформаций обеспечивает почти равномерное распределение напряжений. Небольшие отклонения связаны с наличием трения на торцах или жесткой приваренной (приклеенной) арматуры, ограничивающей радиальные деформации торцов УЭ и приводящей (по крайней мере, в тех частях УЭ, которые прилегают к его торцам), к объемному напряженному состоянию (всестороннему сжатию). При сдвиге и кручении вала в виде трубы можно также обеспечить почти равномерное распределение напряжений.

Указанные схемы нагружения показаны на рис. 1а,б,в. Эти схемы дают очень близкие значения энергоемкости. Металлическая арматура в этих устройствах практически не принимает участия в накоплении энергии, а упругий элемент из эластомера накапливает энергию:

$$U \approx 0{,}009 E_c \cdot V ,$$

где E_c – нормальный модуль упругости при сжатии.

Эта формула пригодна для эластомеров в диапазоне модулей упругости $10<E_c<100$ МПа. Так, для одного из наиболее распространенных эластомеров, полиуретана СКУ-ПФЛ-100, при E=60 МПа получим U=5,4V, МДж.

В связи с этим представляет интерес поиск других схем нагружения УЭ с большим значением энергоемкости. Рассмотрим, например, схему, при которой эластомер сжимается в замкнутом объеме. Упругий элемент помещен в прочный стальной корпус в виде трубы. Многочисленными опытами установлено [10], что объемный модуль упругости для эластомеров составляет примерно $K \approx 3000$ МПа. Если в первом приближении пренебречь деформацией стального корпуса, что пойдет в запас энергоемкости, то удельная энергоемкость УЭ составит:

$$u = \frac{\sigma_*^2}{2K} = \frac{p_*^2}{2K} ,$$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

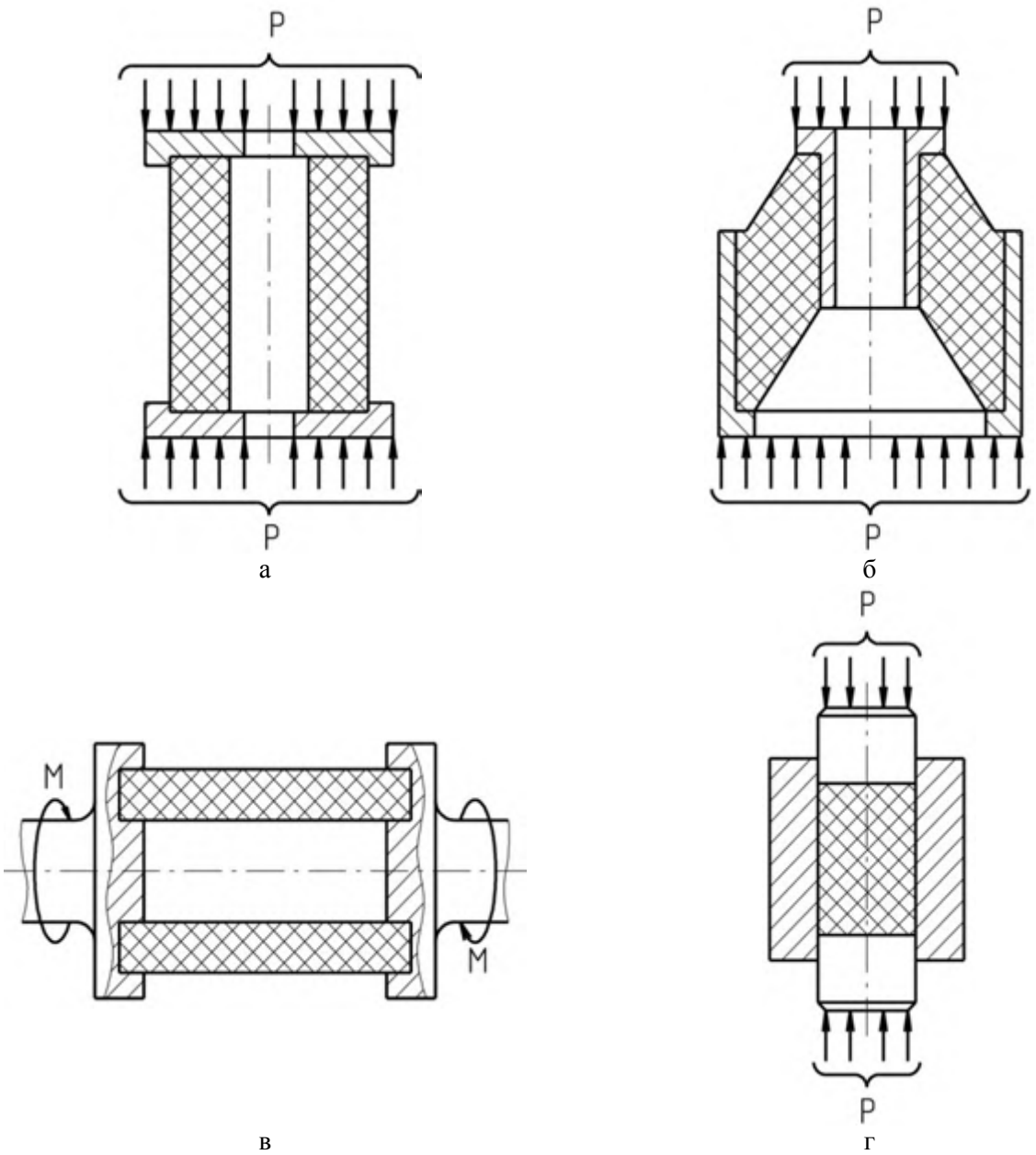


Рис. 1. Схемы нагружения УЭ энергоаккумуляторов:
а – сжатие; *б* – сдвиг; *в* – кручение; *г* – объемное сжатие

где u – удельная энергоемкость; K – объемный модуль упругости; p_* – предельное давление.

Приравнивая эту энергоемкость к максимально возможной при нагружении по схеме одноосного сжатия, получим:

$$\frac{p_*^2}{2K} \approx 0{,}09E,$$

откуда:

$$p_* = \sqrt{0{,}18K \cdot E_c}\ .$$

Для полиуретана СКУ-ПФЛ-100 при E_c=60 МПа получим:

$$p_* = 23{,}2\sqrt{60} = 180 \text{ МПа}.$$

При таком давлении энергоемкость устройства совпадает с энергоемкостью элемента при осевом сжатии. При большем давлении преимущество получает схема (см. рис. 1г) с объемным сжатием эластомера.

Попытаемся в первом приближении учесть деформацию корпуса. Если использовать для изготовления корпуса высокопрочную пружинную сталь (E=2·10^5 МПа; σ=1600 МПа), то относительная деформация корпуса составит ε=0,008. Изменение площади поперечного сечения упругого элемента составит ε_F=0,016, следовательно, на ту же величину возрастет деформация ε_x.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Ранее учитывалась деформация ε_x=180/3000= =0,06=6 %. Дополнительная деформация составляет 1,6/6·100=26,6 %. На эту же величину возрастает энергоемкость.

Граничное давление составит p_*=180/$\sqrt{1{,}266}$ = =160 Мпа. Для корпуса из пружинной стали ($\sigma_в$=1800 Мпа) можно принять предельное напряжение σ_*=1600 Мпа. Тогда удельная энергоемкость (на единицу объема):

$$U = \frac{\sigma_*^2}{2E} = \frac{1600^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^5} = 6{,}4 \text{ МПа},$$

т.е. получили энергоемкость того же порядка, что и для эластомера в замкнутом объеме [27]. Это существенно повышает энергоемкость всего устройства.

Для объемного напряженного состояния (см. рис. 1г) наиболее важным является возможность дальнейшего увеличения давления (например, со 160 до 300 МПа), что увеличивает энергоемкость в 3,5 раза, однако при этом появляются и дополнительные проблемы, основными из которых являются следующие:

– обеспечение прочности корпуса при повышенном давлении в эластомере;

– обеспечение уплотнения;

– реализация требуемой жесткости устройства.

Решение перечисленных вопросов представляет существенные технические трудности, но все эти вопросы разрешимы, поэтому данное устройство следует считать перспективным для достижения удельной энергоемкости 20...25 МПа.

На основании этих расчетов становится возможным создание упругих валов-энергоаккумуляторов для главных линий прокатных станов высокой динамичности, например, главных линий непрерывных широкополосных станов горячей прокатки. Наиболее простой схемой такого вала следует считать вал в виде толстостенной трубы с металлическими торцевыми элементами, соединенными с полиуретановым УЭ.

Варианты соединения могут быть различными – механическими, фрикционными, клеевыми. Все эти варианты рассматривались как возможные. Однако первые два варианта связаны с нарушением целостности УЭ, то есть с возникновением концентраторов напряжений, уменьшающих прочность УЭ (в особенности его усталостную прочность). Напротив, целостность УЭ обеспечивает одинаковое распределение напряжений во всех поперечных сечениях вала, включая его торцевые сечения. Такое (почти равномерное) распределение напряжений обеспечивает высокое значение энергоемкости.

Для случая кручения энергоемкость вала можно определить по формуле:

$$u = \alpha \frac{\tau^2}{G} \cdot V,$$

где α – коэффициент качества напряженного состояния, α=0,5 для идеального (равномерного) распределения напряжений; G – модуль сдвига (для полиуретана СКУ-ПФЛ-100 G=10…12 МПа); τ – максимальное касательное напряжение, МПа.

Для принятой схемы вала с УЭ в виде толстостенной трубы основной проблемой, требующей решения, является прочность клеевого соединения. Для клеевого соединения указанного типа необходимо обеспечить адгезию с металлом и полиуретаном, то есть решить две задачи. Эксперименты проводили на моделях упругого вала (шпинделя), изготовленных в масштабе 1:10 (рис. 2). Полиуретановый УЭ торцом приклеивался к стальным полумуфтам. Установка КМ-200 (максимальный крутящий момент 2000 Н·м), разработанная специально для этих испытаний, показана на рис. 3, а ее кинематическая схема – на рис. 4. В испытаниях опробовались клеи двух типов:

– цианилакриловые клеи холодного отверждения (Si-100; МС-100). Эти два клея показали наилучшие результаты среди клеев холодного отверждения;

– клеи-расплавы на основе термопластичных полиуретанов (типа Desmopan).



Рис. 2. Испытанные модели упругих валов

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



Рис. 3. Установка КМ-200 для испытаний моделей упругих валов

Кроме того, испытывались клеи-расплавы на основе полиамидов, которые показали очень слабую адгезию к полиуретанам.

Результаты испытаний сведены в табл. 1. Максимальные касательные напряжения (в момент разрушения) составляли примерно 5 МПа, что обеспечивает для вала запас прочности n=1,74. Для повышения прочности до n=3,5 нужно увеличить площадь склеивания примерно в 2 раза. Для этого торцы УЭ и металлические полумуфты следует изготовить коническими с углом $\alpha \approx 23°$. Такая форма обеспечивает равномерное распределение напряжений во всех точках поперечного сечения.

Учитывая, что вал-энергоаккумулятор является особо ответственной деталью привода, а также то, что данная конструкция не имеет аналогов, а следовательно, нет опыта эксплуатации подобных конструкций, решено было провести дополнительные испытания моделей подобных валов. При этом преследовались две цели:

1. Установить (хотя бы ориентировочно) масштабные зависимости, относящиеся к прочности и жесткости подобных валов.

2. Получить данные об усталостной прочности упругого элемента вала и деталей его крепления.

Ответ на первый вопрос требует проведения испытаний на крупных моделях (в масштабе 1:2). Такая модель была изготовлена (в варианте механического крепления). Основное затруднение при испытании подобных устройств заключается в отсутствии необходимых испытательных машин и стендов.

Табл. 1. Результаты испытаний клееных моделей упругих валов

№ п/п	Момент, Н·м	Упругий угол,°	Напряжение, МПа	Варианты исполнения упругих валов
1	250	145	5	Склеен desmopan
2	180	110	3,5	Склеен desmopan
3	250	144	5	Склеен desmopan
4	250	90	5	Склеен desmopan
5	250	120	5	Клей SI-100 (после испытания клей остался на полиуретане, другая сторона, склеенная desmopan, выдержала)
6	180	67	3,5	Клей МС-100 (после испытания клей остался на полиуретане; другая сторона, склеенная desmopan, выдержала)
7	325	216	6,4	Клей МС-100 (после испытания клей остался на полиуретане; другая сторона, склеенная desmopan, выдержала)
8	120	67	2,3	Клей МС-100 (клеили на пленку, которая осталась на полиуретане)
9	200	120	4	Склеен desmopan (клей остался на обеих поверхностях)
10	210	81	4,1	Одна сторона склеена desmopan, другая – МС-100
11	230	140	4,5	Склеен desmopan (центрирующий элемент свободно)
12	250	103	5	Склеен desmopan (центрирующий элемент запрессован)
13	260	103	5,1	Склеен desmopan (центрирующий элемент запрессован)

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

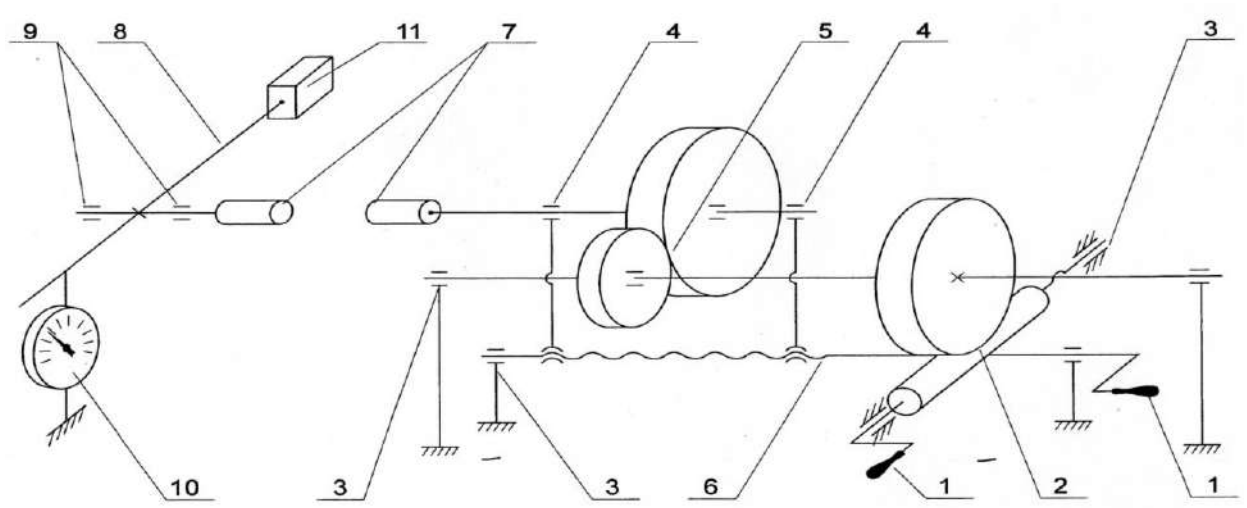


Рис. 4. Кинематическая схема испытательной машины КМ-200:
1 – рукоять; *2* – червячная передача; *3, 4* – подшипники скольжения; *5* – зубчатая передача; *6* – винтовая передача; *7* – прижимы; *8* – рычаг; *9* – подшипники качения; *10* – динамометр; *11* – контргруз

Стандартные машины для испытаний на кручение рассчитаны на крутящие моменты $100 \geq M_к \geq 500$ Н·м. Это очень малые моменты; они не позволяют провести требуемые испытания. В нашем случае крутящий момент зависит от куба линейного размера устройства. При масштабе 1:2 крутящий момент будет составлять $0{,}5^3=0{,}125$ от действующего в приводе прокатного стана.

Расчетный момент на быстроходном валу привода клети №4а равен 80 кН·м (такой момент возникнет при снижении коэффициента динамичности с 3,8 до 1,9). Тогда крутящий момент на модели равен $M_м=0{,}125 \cdot 8010$ кН·м. Этот момент в двадцать раз превышает тот, который развивает стандартная испытательная машина. В связи с этим была разработана схема испытаний, которая использует приспособления к испытательной машине ПР-500. Это приспособление показано на рис. 5.

Оно представляет собой два рычага и систему крепления этих рычагов к торцам испытуемого вала. Подобное устройство может применяться для проверки прочности (с доведением до разрушения) крупных деталей, работающих на кручение. Недостатком данного устройства является ограниченный угол закручивания ($\varphi_{max} \leq 30°$). Поэтому модель упругого вала была значительно короче требуемой. Максимальный угол закручивания составлял не 180°, а 30°. Для того чтобы при этом угле закручивания получить максимальный крутящий момент, пришлось расчетную длину вала уменьшить в 6 раз. При этом была сохранена идентичность по максимальным напряжениям.

УЭ модели (рис. 6) был изготовлен из поли-

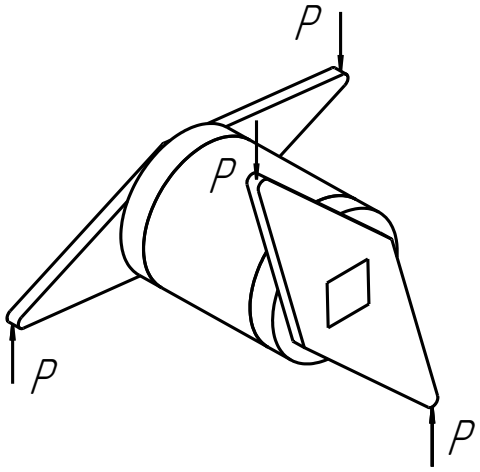


Рис. 5. Приспособление к испытательной машине ПР-500

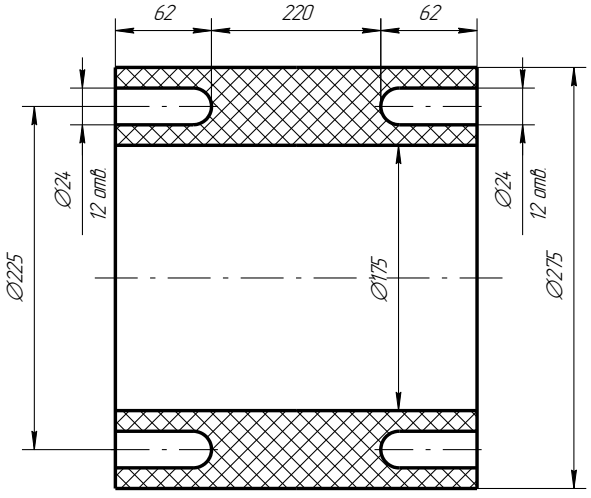


Рис. 6. Упругий элемент модели

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

уретана СКУ-ПФЛ-100. Модель выдержала расчетный крутящий момент $M_м^{max}$=10 кН·м, что соответствует моменту M_c^{max}=125 кН·м на стане. Характеристика испытанного устройства была практически линейной (рис. 7). Остаточных деформаций в полиуретановом УЭ и металлических элементах крепления не обнаружено.

Вопрос об усталостной прочности еще сложнее, так как испытательная техника, пригодная для проведения испытаний полиуретановых УЭ, отсутствует. Как отмечалось выше, испытательных машин для больших крутящих моментов нет (причем ни для статических, ни для усталостных испытаний). Здесь проблема не только в создании высокой нагрузки, но и в большом перемещении, требуемом для создания этой нагрузки, т.е. в большой энергии деформации испытуемого объекта. Существующие пульсаторы к гидравлическим испытательным машинам (например, к машине ГРМ-1) обеспечивают перемещение траверсы машины (а следовательно, и ее захватов) на величину $0 \le \lambda \le 5{,}0$ мм, что не позволяет испытать на усталостную прочность большинство амортизаторов металлургических машин.

Еще одна проблема подобных испытаний связана с большим внутренним трением эластомеров. Это приводит к тому, что требуется затрачивать (совершать) большую работу при подобных испытаниях. Последнее обстоятельство приводит к двум нежелательным эффектам: а) для подобных испытаний нужна машина с большой мощностью привода; б) образец (УЭ, изготовленный из эластомера) может в процессе испытаний перегреваться и разрушаться от перегрева.

С учетом всего изложенного выше, было принято решение испытать на усталостную прочность модель упругого вала в масштабе 1:10; причем в качестве привода использовать привод токарного станка 16К20. Для осуществления нагружения образца по пульсирующему циклу было спроектировано и изготовлено специальное устройство (рис. 8), которое крепится на том же токарном станке. Один из приводных концов вала крепится в патроне токарного станка. Второй конец через промежуточную сцепную муфту зафиксирован в резцедержателе. Сцепная муфта выполняет функцию поочередного соединения и рассоединения привода.

Испытания проводились при скорости вращения патрона n_1=35 об/мин и n_2=60 об/мин. Большие скорости не применялись из-за опасности перегрева УЭ и появления повышенных динамических нагрузок в сцепном устройстве. Частота нагружения составляла: 1) 35·4=140 мин$^{-1}$; 2) 60·4=240 мин$^{-1}$.

Общее число нагружений составило N=5·10^5. Это соответствует безаварийной работе вала в течение 12 месяцев. Нагружение проводилось по отнулевому (пульсирующему) циклу. Напряжение в УЭ регулировалось изменением его длины. Это напряжение (как и расчетное напряжение в проектируемом вале) составляло τ_{max}=2,88 МПа. Механическое крепление образца выдержало эти испытания. Следов разрушения не обнаружено.

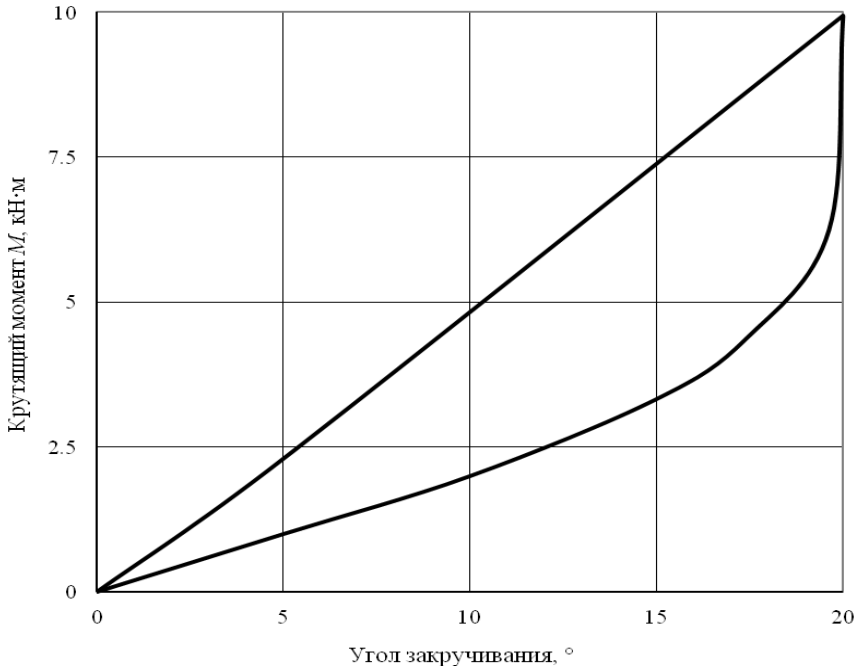


Рис. 7. Характеристика модели упругого шпинделя

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

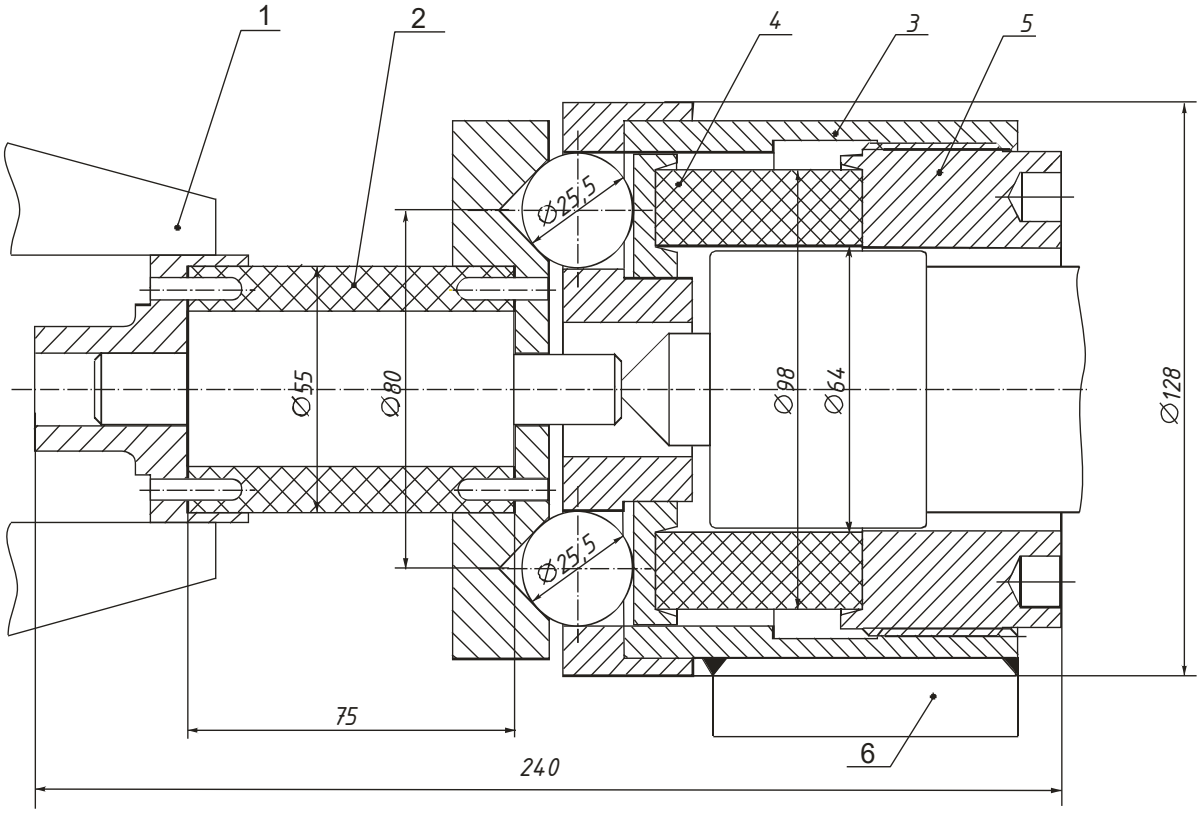


Рис. 8. Устройство для испытания моделей упругого шпинделя на усталостную прочность:
1 – патрон токарного станка; *2* – модель упругого вала; *3* – пружинно-шариковая муфта;
4 – упругая втулка; *5* – гайка регулировки момента срабатывания муфты;
6 – хвостовик, устанавливаемый в резцедержатель станка

При установке этого вала его длина может быть уменьшена на 10…12 мм посредством стягивания двумя специальными шпильками. УЭ установлен на центрирующей трубе с гарантированным натягом по диаметру Δd=4 мм. Это устраняет «раздувание» вала при большой скорости вращения (n=600 об/мин). Кроме того, натяг позволяет использовать работу трения УЭ по трубе для демпфирования колебаний в главной линии стана, а также улучшает коэффициент асимметрии цикла, а значит, и его усталостную прочность.

Экспериментальная проверка требуемого натяга была выполнена на установке, показанной на рис. 9. Исследование процесса деформации УЭ от действия центробежных сил было выполнено на модели опытным путем. Модель была изготовлена из полиуретана марки adiprene L 167 с размерами D=220 мм, d=110 мм. Полиуретановое кольцо было установлено с натягом δ=2 мм на жесткую цилиндрическую оправку, закрепленную в патроне токарного станка. Цилиндрическая поверхность кольца проточена и смазана. В резцедержателе станка установлен индикатор часового типа для измерения радиальной деформации полиуретанового кольца.

Скорость вращения кольца изменялась в пределах 500…1600 об/мин. При скорости от 1250 до 1600 об/мин увеличение радиуса кольца составило Δr=0,02…0,03 мм. Пересчет на натуральный вал дает деформацию $\Delta R\approx$1,0 мм; теоретические расчеты дают увеличение диаметра вала $\Delta D=2\Delta R$=2,2 мм. В проекте принят натяг по диаметру вала $\Delta D_{кр}$=4 мм.

Таким образом, при вращении вала и действии на его УЭ центробежных сил натяг не исчезнет. Остаточная величина натяга составит $\Delta D_{ост}$=4–2,2=1,8 мм.

На основании проведенных исследований разработаны два варианта упругого вала. Первый из них – простейшая клееная конструкция, второй – с соединением стальных полумуфт с УЭ при помощи стальных пальцев. Клееная конструкция упругого вала содержит две стальные полумуфты, полиуретановый УЭ и стальную трубу. Стальные полумуфты и УЭ склеиваются по конической поверхности для увеличения площади склеивания и более равномерного распределения напряжений в теле УЭ. Труба, расположенная внутри УЭ, центрирует его, предотвращая потерю устойчивости при перегрузках. Конструкция с механическим креплением также содержит две стальные полумуфты, в каждой из которых имеется по 12 отверстий для установки стальных пальцев.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

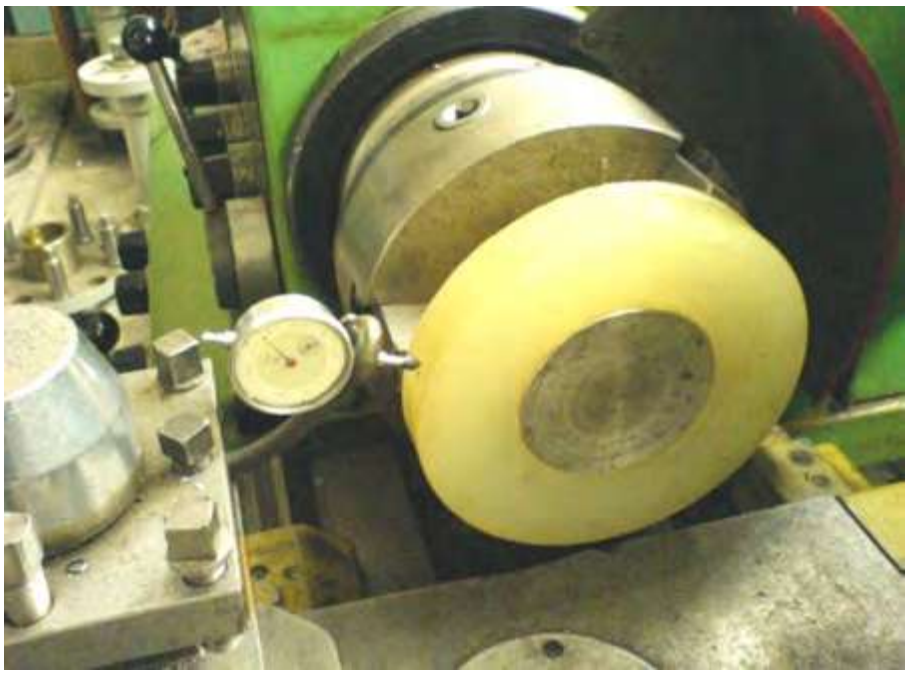


Рис. 9. Установка для проверки натяга

Между двумя полумуфтами установлен УЭ, имеющий на каждом торце по 12 углублений для пальцев. Внутри УЭ установлена центрирующая труба, обеспечивающая устойчивость вала в процессе нагружения. Основные требуемые технические характеристики вала-энергоаккумулятора для черновой клети №4а НШС-1700 ПАО «ММК им. Ильича» составят:

Передаваемый крутящий момент M^*=80 кН·м. Момент сопротивления поперечного сечения:

$$W_p \approx 0{,}2 \cdot D^3 \cdot (1 - c^4),$$

где $c = \frac{d}{D} = \frac{350}{550} = 0{,}636.$

$$W_p \approx 0{,}2 \cdot 55^3 \cdot (1 - 0{,}636^4) = 27800 \text{ см}^3.$$

Максимальные касательные напряжения:

$$\tau_{max} = \frac{M^*}{W_p} = \frac{80 \cdot 10^3}{27800 \cdot 10^{-6}} = 2{,}88 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2;$$

$$\tau_{max} = 2{,}88 \text{ МПа}.$$

Угол сдвига:

$$\gamma = \frac{\tau_{max}}{G} = \frac{2{,}88}{10} = 0{,}288 \text{ рад}.$$

Максимальный угол закручивания:

$$\varphi_{max} = \gamma \cdot \frac{l}{R} = 0{,}288 \cdot \frac{1750}{225} = 2{,}24 \text{ рад}.$$

$$\varphi_{max} = 2{,}24 \cdot \frac{180}{3{,}14} = 128{,}4°.$$

Выводы

Результаты проведенных испытаний подтверждают возможность создания и эффективной работы упругого вала-энергоаккумулятора для приводов черновых клетей НШС. На основании проведенных исследований предложены две конструкции упругого вала – с клеевым и механическим соединением УЭ с полумуфтами. Определены основные требуемые технические характеристики вала-энергоаккумулятора для черновой клети №4а НШС-1700 ПАО «ММК им. Ильича».

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 19-08-01241а.

Список литературы

1. Kukhar, V.V. O.V. Vasylevskyi. Experimental research of distribution of strains and stresses in work-piece at different modes of stretch-forging with rotation in combined dies / V.V. Kukhar, O.V. Vasylevskyi // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – No.3. – P. 71-78.
2. Большаков, В.И. Исследования динамики, прочности и надежности металлургических машин / В.И. Большаков, В.К. Цапко // Захист металургійних машин від поломок: міжвузівський тематичний зб. наук. праць. – Маріуполь, 2002. – Вип. 6. – С. 6-27.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

3. Артюх, В.Г. Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах. – Мариуполь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 246 с.
4. Веренев, В.В. Динамические процессы в полосовых станах холодной прокатки. – Днепропетровск: ЛИРА, 2015. – 12 с.
5. Веренев, В.В. Переходные процессы при непрерывной прокатке / В.В. Веренев, А.Ю. Путноки, Н.И. Подобедов. – Днепропетровск: Літограф, 2017. – 116 с.
6. Krot, P.V. Statistical dynamics of the rolling mills / Proceedings of the IUTAM Symposium, St. Petersburg, Russia, July 5-9, 2009 // IUTAM Bookseries. – 2011. – Vol.27. Part 4. – P. 429-442.
7. Konno, Y. Analysis of Mechanism of Unsteady Load in Strip Rolling Processes and Its Control in Commercial Lines / Y. Konno, S. Shibuya, S. Tanaka // Kawasaki Giho. – 2001. – No.33. – P. 37-42.
8. Solomonov, K. Simulation of forming a flat forging / K. Solomonov, L. Tishchuk, N. Fedorinin // Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – Vol.918. Article No.012038.
9. Current Views on the Detailed Design of Heavily Loaded Components for Rolling Mills / V. Mazur et al. // Engineering Designer. – 2012. – No.1. Vol.37. – P. 26-29.
10. Артюх, В.Г. Основы защиты металлургических машин от поломок. – Мариуполь: Издат. группа «Университет», 2015. – 288 с.
11. Loading Decrease in Metallurgical Machines / S. Nabeel et al. // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2014. – No.8(12). – P. 1461-1464.
12. Mazur, V. Horizontal Force During Rolling as Indicator of Rolling Technology and Technical Conditions of Main Rolling Equipment / V. Mazur, V. Artiukh, M. Matarneh // Procedia Engineering. – 2016. – No.165. – P. 1722-1730.
13. Artiukh, V. Priority Influence of Horizontal Forces at Rolling on Operation of Main Sheet Rolling Equipment / V. Artiukh, V. Mazur, A. Adamtsevich // MATEC Web Conf. – 2017. – Vol.106. Article No.04001.
14. Reasonability to use device for making horizontal wedge thrust of rolling stand / V. Artiukh et al. // MATEC Web Conf. – 2018. – Vol. 170. – Article No.03011.
15. Artiukh, V. Device for Making Horizontal Wedge Thrust of Rolling Stand / V. Artiukh, V. Mazur, L. Shilova // MATEC Web Conf. – 2017. – Vol.106. Article No.03002.
16. Artiukh, V. Influence of Strip Bite Time in Work Rolls Gap on Dynamic Loads in Strip Rolling Stands / V. Artiukh, V. Mazur, E. Pokrovskaya // MATEC Web Conf. – 2016. – Vol.86. Article No.01030.
17. Experimental study of horizontal impact forces acting on equipment of thick sheet rolling stands during rolling / A. Ishchenko et al. // MATEC Web Conf. – 2018. – Vol.239. Article No.01041.
18. Experimental determination and study of horizontal forces during rolling / V. Mazur et al. // MATEC Web Conf. – 2018. – Vol.239. Article No.01042.
19. Yakovlev, S.N. Vibroisolating properties of polyurethane elastomeric materials, used in construction / S.N. Yakovlev, V.L. Mazurin // Magazine of Civil Engineering. – 2017. – No.6. – P. 53-60.
20. Pestryakov, I.I. Assessment of efficiency of the vibration damping material «Teroson WT 129» / I.I. Pestryakov, E.I. Gumerova, A.N. Kupchin // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2016. – No.5(44). – P. 46-57.
21. Artiukh, V.G. Peculiarities of Mechanical Characteristics of Contemporary Polyurethane Elastomers / V.G. Artiukh, S.Yu. Karlushin, E.N. Sorochan // Procedia Engineering. – 2015. – No.117. – P. 938-944.
22. Яковлев, С.Н. Проектирование и основы технологии деталей машин из полиуретана. – СПб.: Реноме, 2013. – 176 с.
23. Choice of Elastomeric Material for Buffer Devices of Metallurgical Equipment / M.F. Firas et al. // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2012. – No.4(11). – P. 1585-1589.
24. Experimental study of repair mixtures as glues for connecting elastomers with metals / A. Ishchenko et al. // MATEC Web Conf. – 2019. – Vol.265. Article No.01016.
25. Мазурин, В.Л. Определение статической деформации полиуретановых амортизаторов, работающих на сдвиг // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – №1(190). – С. 143-148.
26. Adapters for metallurgical equipment / V. Artiukh et al. // MATEC Web Conf. – 2018. – Vol.170. Article No.03028.
27. Energy intensity of parts made from polyurethane elastomers / V.G. Artiukh et al. // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No.81(5). – P. 102-115.
28. Артюх, В.Г. К вопросу повышения «качества» листопрокатных станов // Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер.: Технічні науки. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2014. – Вип.29. – С.140-145.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

V.G. Artiukh /Dr. Sci. (Eng.)/, N.V. Chernysheva /Cand. Sci. (Eng.)/, E.L. Yakovleva /Cand. Sci. (Eng.)/
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg)
A.A. Nikitchenko
Research and Development Centre for Transportation Technology (St. Petersburg)
V.O. Mazur
LLC «Saint-Petersburg Electrotechnical Company» (St. Petersburg)

TESTING MODELS OF ELASTIC DAMPING SHAFT-ACCUMULATOR OF CONTINUOUS STRIP MILLS DRIVE UNIT

Background. *Continuous strip mills (CSM) have very high dynamism and accident rate. Rolls, drive spindles, bearings, chuck and support lugs collapse in operation. The high rigidity of the equipment mentioned and its low power consumption is the main reason for such a situation. In these conditions, parasitic loadings appear (for example, the horizontal force acting on the working rolls and rolling mill roll line). The main objective of the article is to show a possibility of creation of the active device for parasitic loadings reduction (damping shaft-accumulator with elastic polyurethane part).*
Materials and/or methods. *For the achievement of the main objective, the following problems formulated and solved: necessary mechanical characteristics of polyurethane elastomeric materials for elastic part of damping shaft-accumulator defined; several versions of elastic spindle shaft of the drive unit of breaking-down roll mill stand developed; the equipment for glued models flexible shafts testing constructed. In additional tests, the scale dependences relating to reliability and rigidity of these shafts established; data on the fatigue endurance of shaft elastic element and its holding elements obtained. For these purposes, the contrivances for testing equipment and lathe machine designed. Also, testing equipment developed for check of the required tightness of an elastic element.*
Results. *The possibility of design of the active device (damping shaft-accumulator with elastic polyurethane part) shown. Necessary mechanical characteristics of polyurethane elastomeric materials for an elastic part in question defined. For non-standard tests of these elastic parts, necessary testing equipment designed. Versions of designs of an elastic damping shaft-accumulator developed.*
Conclusion. *The results of performed tests confirmed a possibility to create an effective operating damping elastic shaft-accumulator. Based on the research data, two versions of flexible shaft design – with glue and mechanical connection of an elastic element with half-coupling – are offered.*

Keywords: *continuous strip mills (CSM), energy consumption, energy damping, flexible shaft and clutch, elastomeric and polymeric materials, damping shaft-accumulator.*

Сведения об авторах

В.Г. Артюх
SPIN-код: 4538-4854
Телефон: +7 (931) 579-70-53
Эл. почта: artiukh@mail.ru

Е.Л. Яковлева
SPIN-код: 4575-6835
Телефон: +7 (911) 748-70-00
Эл. почта: helena47@mail.ru

В.О. Мазур
SPIN-код: 9893-6200
Телефон: +7 (921) 369-17-60
Эл. почта: mazur@spbec.com

Н.В. Чернышева
SPIN-код: 6083-7531
Телефон: +7 (981) 771-32-36
Эл. почта: chernat0000@mail.ru

А.А. Никитченко
SPIN-код: 2783-2760
Телефон: +7 (921) 184-32-73
Эл. почта: anikita@i.ua

Статья поступила 22.06.2019 г.
© В.Г. Артюх, Н.В. Чернышева, Е.Л. Яковлева, А.А. Никитченко, В.О. Мазур, 2019
Рецензент д.т.н., проф. А.В. Яковченко

УДК 662.61

В.В. Кашаев /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНЫМИ ГОРЕЛКАМИ В КУЗНЕЧНОЙ ПЕЧИ КАМЕРНОГО ТИПА

Выполнена сравнительная оценка эффективности применения высокоскоростной рекуперативной горелки ГСР-150КР и зарубежных аналогов по показателям: коэффициент полезного действия рекуператора и коэффициент использования тепла печи, оборудованной этими горелками. Проведен анализ особенностей управления высокоскоростными рекуперативными горелками и проведено сравнение ориентировочных показателей инвестиций в нагрев газом и электричеством в применении для высокотемпературных процессов.

Ключевые слова: *кузнечная печь, высокоскоростная рекуперативная горелка.*

Постановка проблемы

При эксплуатации кузнечных печей важная проблема – это повышение энергоэффективности агрегата. На большинстве работающих подобных печах с отходящими газами теряется более 50 % потенциала тепловой энергии. Следовательно, потенциал энергосбережения в данной ситуации является весьма существенным, а грамотное использование этого потенциала даст возможность сократить издержки предприятий.

Анализ последних исследований и публикаций

Изначально рекуперативные горелки были разработаны для того, чтобы рационально использовать тепло дымовых газов для подогрева воздуха горения в непосредственной близости от агрегата, без потерь тепловой энергии при транспортировке горячих газов по трубопроводам [1,2].

Любой рекуператор представляет собой теплообменник, который обеспечивает подогрев поступающего воздуха горения за счет тепловой энергии отходящих газов и экономию около 30 % энергии по сравнению с системой, использующей холодный воздух горения.

Но рекуператор, как правило, не может обеспечить подогрев воздуха до температуры, превышающей 550…600 °С. Рекуперативные горелки используются, в том числе, и при достаточно высокой рабочей температуре процесса (до 800…1300 °С) [3,4,5].

Высокоскоростные рекуперативные горелки дают реальную возможность снизить удельный расход природного газа и сократить текущие эксплуатационные затраты теплового агрегата. Подобные горелки оснащены высокоэффективным теплообменником-рекуператором либо из металла, либо из керамики, в котором воздух, идущий на горение, нагревается до 700…770 °С. При этом, коэффициент использования топлива находится на уровне 80…86 % [6,7].

Весьма важное ограничение для современных рекуперативных горелок – это противоречие между требованиями по сокращению выбросов вредных веществ в окружающую среду и требованиями энергоэффективности технологии. Объемы образования NO_x при использовании топлив, не содержащих азот, зависят, в основном, от температуры сжигания топлива, концентрации кислорода и времени нахождения газов в зоне горения в печи.

При сжигании при традиционной технологии результатом подогрева воздуха до значительных температур является высокая пиковая температура пламени, которая в сочетании со значительным временем пребывания приводит к существенному увеличению интенсивности образования NO_x, что неприемлемо по современным требованиям по экологической безопасности [3,8].

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является провести оценку эффективности применения высокоскоростной рекуперативной горелки на кузнечных печах камерного типа, используя в качестве горелки новую высокоскоростную рекуперативную горелку типа ГСР-150КР, и изучить особенности по управлению подобными горелками в печах, а также провести анализ по мощности и стоимости различных рекуперативных горелок.

Основной материал исследования

Чтобы в достаточной мере обеспечить необходимые параметры качества нагрева металла,

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

нужно использовать новые горелочные устройства. Также это даст возможность обеспечить равномерный нагрев всех заготовок в печи, что особенно актуально для кузнечных печей камерного типа.

Преимущество новых рекуперативных горелок перед старыми состоит в том, что они снабжаются блоками автоматики, которая дает возможность эффективно регулировать соотношение газ – воздух в тепловом агрегате без вмешательства специалистов.

Эффективность любой современной рекуперативной горелки можно оценить, используя такой показатель, как коэффициент полезного действия ($\eta_Г$) рекуператора. При этом коэффициент полезного действия рекуператора находится как соотношение между количеством теплоты, полученной воздухом в рекуператоре, и количеством теплоты, содержащейся в продуктах сгорания, входящих в рекуператор, по следующей формуле [1]:

$$\eta_Г = \frac{L_B \times (C_{B2} t_{B2} - C_{B1} t_{B1})}{B_H \times V_\alpha \times c_{ПГ} \times t_{ПГ}} \times 100\%, \quad (1)$$

где B_H – расход топлива через горелку, м^3/с; L_B – действительное количество воздуха, подаваемое для сжигания единицы топлива, м^3/м^3; C_{B2} – теплоемкость воздуха при температуре его подогрева в рекуператоре, кДж/(м^{3}К); t_{B2} – температура подогрева воздуха в рекуператоре, ^{o}С; C_{B1} – теплоемкость воздуха при температуре t_{B1}=20 ^{o}С, кДж/(м^{3}К); V_α – объем продуктов сгорания, образующихся при сжигании единицы топлива, м^3/м^3; $c_{ПГ}$ – теплоемкость продуктов сгорания на входе в рекуператор, кДж/(м^{3}К); $t_{ПГ}$ – температура продуктов сгорания на входе в рекуператор, ^{o}С.

Расчет коэффициента полезного действия, проведенный по формуле [1], для известных рекуперативных горелок иностранных производителей, на основании данных рекламных материалов компаний – производителей горелок по температуре подогрева воздуха и температуре продуктов сгорания при коэффициенте расхода воздуха 1,1, продемонстрировал, что этот показатель составляет 40 %.

Для горелки ГСР-150КР, предложенной для оснащения в кузнечных печах камерного типа при температуре подогрева воздуха 770 °С, температуре в печи 1300 °С и коэффициенте расхода воздуха 1,15 коэффициент полезного действия составит 60,7 %.

Можно сделать вывод, что коэффициент полезного действия высокоскоростной горелки ГСР-150КР более чем на 20 % превышает КПД известных горелок подобного типа.

Кроме этого, эффективность использования рекуперативной горелки можно оценить и по коэффициенту использования тепла для печи $\eta_{ИТ}$, оборудованной данными горелками.

Этот коэффициент может быть рассчитан по следующей формуле [2]:

$$\eta_{ИТ} = \left(1 \times \frac{V_\alpha \times c_{ПГ1} \times t_{ПГ1}}{Q_H^P + L_B \times (C_{B2} t_{B2} - C_{B1} t_{B1})}\right) \times 100\%, \quad (2)$$

где L_B – действительное количество воздуха, подаваемое для сжигания единицы топлива, м^3/м^3; C_{B2} – теплоемкость воздуха при температуре его подогрева в рекуператоре, кДж/(м^3 К); t_{B2} – температура подогрева воздуха в рекуператоре, ^{o}С; C_{B1} – теплоемкость воздуха при температуре t_{B1}=20 °С, кДж/(м^{3}К); V_α – объем продуктов сгорания, образующихся при сжигании единицы топлива, м^3/м^3; $c_{ПГ1}$ – теплоемкость продуктов сгорания после горелки, кДж/(м^{3}К); $t_{ПГ1}$ – температура продуктов сгорания после горелки, ^{o}С.

Если провести расчет по формуле (2) для известных зарубежных горелок с учетом температуры продуктов сгорания после горелки 550 °С при их температуре на входе в горелку 1000 °С, то этот коэффициент использования тепла составит 75,6 %.

В то время как для высокоскоростной горелки ГСР-150КР при температуре дыма после горелки 400 °С, этот показатель будет достигать отметки в 85,5 %.

Если проанализировать вышеприведенные данные расчетов, теплопотери в кузнечной печи при использовании наших высокоскоростных горелок ГСР-150КР примерно на 10 % ниже, чем при использовании известных подобных марок горелок.

Отсюда следует, что высокоэффективные горелки ГСР-150КР, рекомендованные к установке на кузнечной печи камерного типа, позволят экономить примерно на 10 % больше газового топлива в сравнении с рекуперативными горелками, которыми оснащены данные тепловые агрегаты в настоящий момент.

Помимо того, невысокая температура продуктов сгорания после рекуператора, объясняющаяся высокой температурой подогрева воздуха, дает широкие возможности по снижению расхода воздуха на эжекцию продуктов сгорания в высокоскоростных горелках ГСР-150КР, т.к. не нужно разбавлять продукты сгорания воздухом для того, чтобы снизить их температуру при последующей их транспортировке по дымопроводам.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В высокоскоростной рекуперативной горелке ГСР-150КР соотношение между расходом воздуха на эжекцию и горение примерно 0,9, тогда как в других известных рекуперативных горелках этот показатель колеблется в пределах 1,7…2. Это приводит к дополнительным энергетическим затратам на привод вентилятора, что, в свою очередь, существенно сокращает общую эффективность применения горелок подобного типа.

При всех вышеуказанных преимуществах высокоскоростная рекуперативная горелка ГСР-150КР имеет примерно такие же габариты, как и зарубежные горелки схожего типа, но она существенно дешевле импортных горелок от известных производителей, таких как ECOMAX, RECUMAT, RECUFIRE и др.

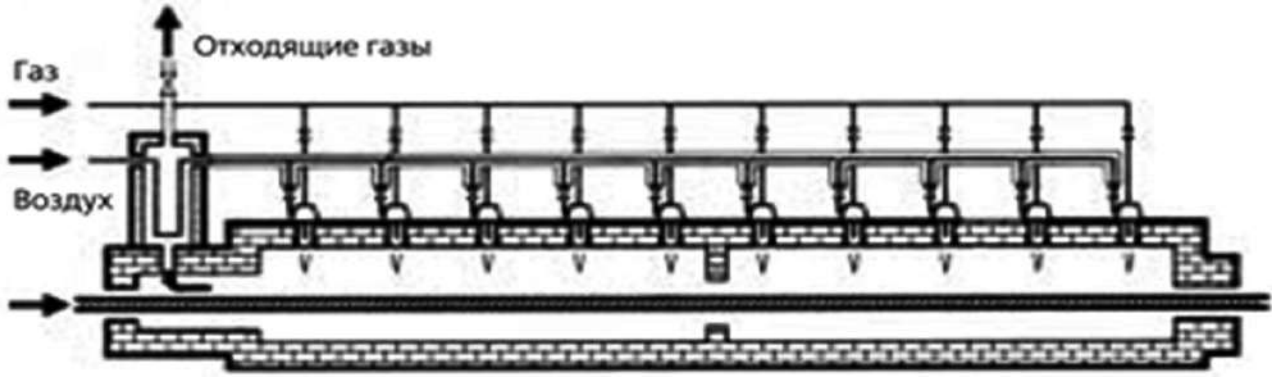
Проведем сравнение между конвекционной системой с центральным рекуператором и рекуперативными горелками (рис. 1). Главное различие заключается в расположении и конструкции теплообменника в печи.

В рекуперативных горелках проточные каналы и поверхность теплопередачи лучше оптимизированы по технологическим параметрам, чем при применении центрального рекуператора в печи, и естественно, обеспечивается намного более высокая удельная мощность теплопередачи.

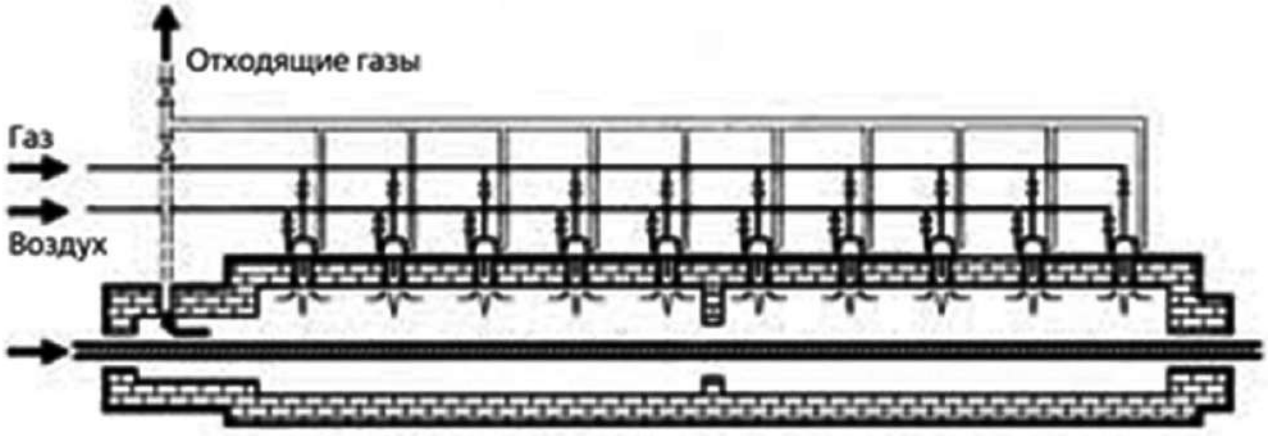
При применении высокоскоростных рекуперативных горелок нужные для центрального рекуператора воздушные короба и трубопроводы на «горячей» стороне для подачи теплого воздуха просто отсутствуют за ненадобностью. А сами уходящие газы при их использовании собираются в коллектор, изоляция при этом обычно не нужна.

Для центральных рекуперативных систем автовентили горячего воздуха обязаны надежно функционировать на всех горелках при воздействии высокой температуры и при давлениях от 2 до 6 кПа при достаточно высокой частоте включения вентилей. Кроме того, существуют серьезные проблемы по равномерному распределению горячего воздуха на каждую отдельную горелку в кузнечной печи.

К сожалению, не существует общего мнения у специалистов-теплотехников и специалистов-производственников на металлургических предприятиях по расходам в системах с центральным рекуператором и с рекуперативными горелками при одинаковой обратной теплоотдаче. Необходимо проводить комплексные исследования на печах для каждого конкретного случая.



а



б

Рис. 1. Варианты конструкционного расположения теплообменника в печи:
а – система с центральным рекуператором; *б* – система с рекуперативными горелками

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В кузнечных печах камерного типа предварительный подогрев воздуха с температурой примерно на 50 % выше температуры дымового газа до рекуператора печи. Реально этого можно добиться только в современных высокоскоростных рекуперативных горелках, в частности на ГСР-150КР.

Показанная на рис. 1 часть потока отходящего газа позже проходит через зону предварительного подогрева.

Важная область в любых научных разработках в горелочной технике – это управление высокотемпературным горением, т.е. работой современных высокоскоростных рекуперативных горелок в кузнечных печах камерного типа.

Высокий импульс пламени может быть использован только на горелке с управлением вкл./выкл. Подвод энергии полностью достигается с помощью тактового или кругового управления, несмотря на псевдопостоянное регулирование. Для таких систем необходимо достаточное количество горелок, в особенности, если регулировочное число велико и из-за давления в печи необходима постоянная работа минимум одной горелки.

При управлении вкл./выкл., которое сегодня довольно широко используется, трубная разводка становятся проще, чем при пропорциональном зональном управлении. Поток газа, сжигаемого воздуха и отходящего газа настраивается на каждой горелке на единственно возможную оптимальную рабочую точку. Естественно, наилучшие результаты работы управления вкл./выкл. достигаются при подключении к цифровой компьютерной системе.

Хотя избыток воздуха у рекуперативных горелок из-за низкой температуры отходящего газа не так сильно влияет на потери, необходимо стараться удерживать смесь в узком диапазоне с отклонением до 10 %. Так как сопротивление рекуператора изменяется вместе с температурой предварительного нагрева, обычная регулировка для постоянного давления здесь неприменима.

Пневматическая регулировка соотношения может держать постоянной смесь, а не потоки. При пуске при холодной горелке они становятся максимальными, что нежелательно для стабильности сгорания. Регулировка соотношения применяется при пропорциональном управлении зонами, но для каждой отдельной горелки это очень проблематично.

При регулировании потоки газа, равно как и воздуха, в рабочей точке удерживаются постоянными с помощью регулятора разности давления, также регулируется и горючая смесь. Колебания давлений в сети, которые неизбежны из-за конструктивной формы вентилятора или системы трубопроводов, компенсируются на каждой горелке, равно как и колебания встречного давления в рекуператоре, печи или системе отвода дымовых газов.

Дымовые газы, как правило, просто отсасываются с помощью воздушного потока через каждую горелку, для чего к эдуктору подводится воздух по объему до 1,5 раза больше, чем объем воздуха для горения. Если этого необходимо избежать, то отходящие газы отсасываются через соответствующий клапан. Тепло отходящего газа в таком случае может быть использовано в дальнейшем. С помощью давления отсоса можно регулировать давление в печи.

Настройка рециркуляции отходящего газа каждой горелки не оказывает большого воздействия на рекуперацию тепла.

Рабочая область и область стабилизации описанных рекуперативных горелок для различных размеров представлены на рис. 2. В нижнем стехиометрическом режиме отходящий газ может использоваться для получения защитной атмосферы.

Пламя остается стабильным также при большом избытке воздуха, так что в особых случаях газ может регулироваться в соотношении 4:1 при полном объеме воздуха. Таким образом, импульс горелки в печи остается сохраненным при умеренных затратах, так как воздух на горение предварительно сильно нагревается.

Проанализируем такие важные характеристики, как мощность и стоимость рекуперативной горелки.

Рекуперативные горелки используются в различных типах печей в температурном диапазоне 500…1300 °С. При мощности более 250 кВт достигаются предельно допустимые габариты горелок с предварительным нагревом воздуха. Поэтому рекуперативные горелки мало находят применение для нагревательных печей очень большой мощности, например, на прокатных станах, но идеально подходят для небольших кузнечных камерных печей для нагрева штамповок и поковок.

Влияние вида газа, исключая «бедные» газы, незначительно, поскольку количество воздуха для горения на единицу мощности остается почти постоянным (1 $м^3$/ч на 1 кВт).

Относительный предварительный нагрев воздуха несколько увеличивается при одинаковых условиях вместе с температурой отходящих газов, так как возрастает коэффициент теплопередачи.

Давление в камере сгорания напрямую влияет на мощность рециркуляции в печи.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

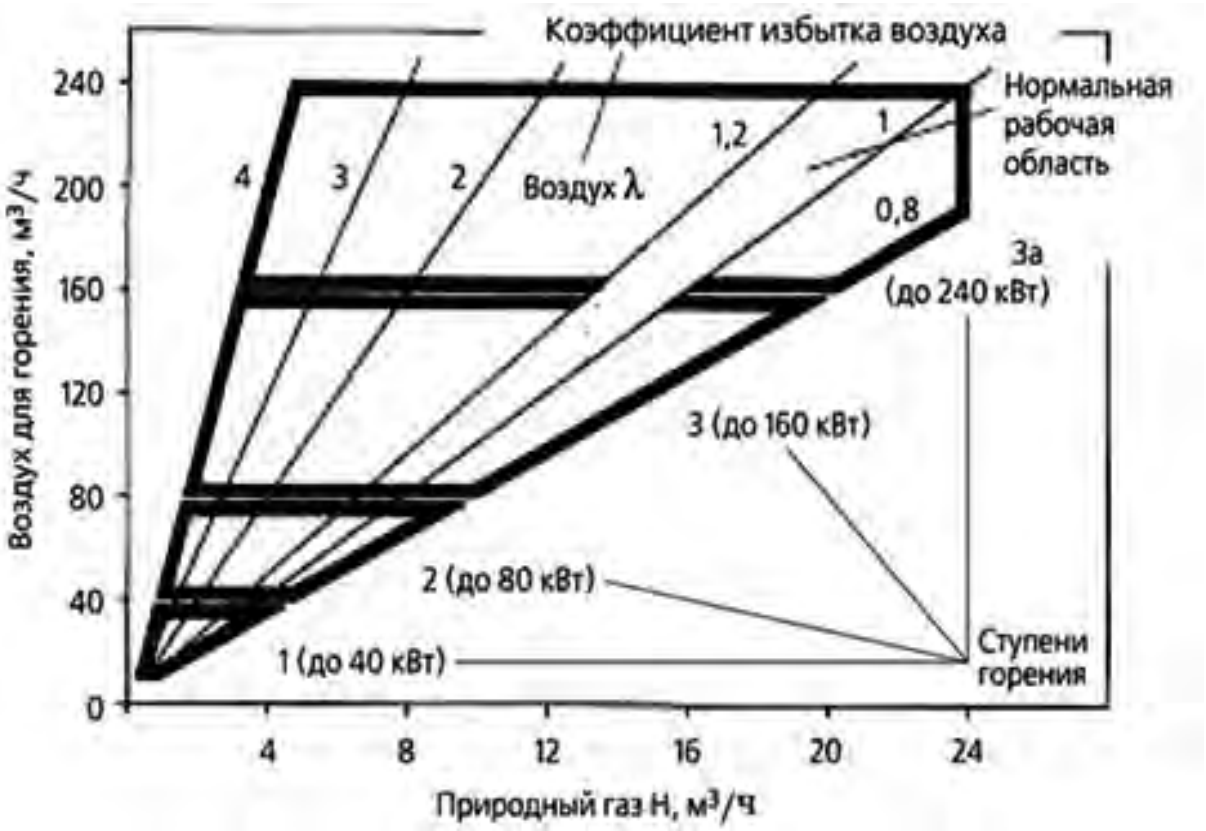


Рис. 2. Рабочая область и участок стабилизации высокоскоростной рекуперативной горелки

Диапазон давления от 1 до 2 кПа, достигаемый с помощью одноступенчатых вентиляторов (максимально 10 кПа), при необходимости может увеличиться при увеличении предварительного давления воздуха, но при этом следует обратить внимание на коэффициент шума.

Показатель NO_2 в сухом отходящем газе необходимо всегда рассматривать с предварительным нагревом воздуха. Показатель 220 ppm NO_2 при предварительном нагреве 770 °С, отражает сегодняшний уровень развития.

В табл. 1 приведены ориентировочные показатели инвестиций в нагрев газом и электричеством в применении для высокотемпературных процессов. Инвестиции приведены в евро для удобства сравнения с зарубежными источниками.

Данные по инвестициям в табл. 1 относятся к величине потребляемой мощности горелки от 20 до 240 кВт.

У высокоскоростных горелок без рекуператоров удельные затраты зависят в основном от размера горелки. Это влияние у рекуперативных горелок снижается, в особенности у излучающих радиантных труб, так как требуемые поверхности рекуператоров и поверхности излучения радиантных труб увеличиваются пропорционально величине мощности.

Удорожание рекуператора в пределах 40…70 евро на 1 кВт должно в каждом случае сопоставляться с более высоким коэффициентом полезного действия (коэффициентом использования топлива). Ежегодная экономия в евро на 1 кВт мощности соответствует относительной экономии, умноженной на удельную цену газа в евро/кВт·ч и ежегодную эксплуатацию горелок в часах.

Это можно пояснить на следующем примере:

– удельная цена газа – 0,03 евро/кВт·ч;

– экономия благодаря предварительному нагреву воздуха – 30 %;

– время работы горелки в год – 5000 часов.

Соответственно, годовая экономия на 1 кВт мощности составит 45 евро при использовании высокоскоростных рекуперативных горелок.

В данном примере видно, что дополнительные расходы на рекуператор амортизируются в зависимости от размера горелки за период от одного до двух лет.

В зоне выдержки с меньшим временем работы горелок в год частично используются горелки с системой ступенчатого сжигания топлива, но без рекуператора.

В табл. 1 приведено сравнение нагрева печей с различным оснащением. Сегодня, как правило, с целью облегчения технического обслуживания используют элементы горелок, которые можно заменить снаружи.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 1. Сравнение размера инвестиций для печей на газовом и электрическом топливе

Вид нагрева	Инвестиции, евро/кВт
Высокоскоростные горелки с низким содержанием NO_2	9…70
С исполнительным элементом, зажиганием и контролем	20…160
Дополнительно со встроенным рекуператором	50…230
Дополнительно с излучающей трубой	160…360
Электрический нагрев с несущей трубой в печи	≈35
Электрический нагрев с несущей трубой в печи в качестве вставки	≈140
Дополнительно трансформатор	≈250
Дополнительно с защитной трубой	≈350

В ценовые показатели для газового нагрева не включены данные по регулятору давления газа, вентилятору для воздуха горения и трубопроводу, а также по подводу электричества и силовой защите для электрического нагрева.

Для газового нагрева необходимо учитывать теплотехнический коэффициент полезного действия (коэффициент использования топлива). Сравнение показывает преимущества газового нагрева, так как удельные затраты на электрический ток почти втрое выше, чем для газа. Улучшение качества нагрева благодаря рециркуляции при прямом газовом нагреве при этом в расчет не принимается.

Высокоскоростные рекуперативные горелки предлагают значительные преимущества по сравнению с традиционными горелочными системами для кузнечных печей камерного типа в температурном диапазоне 1000…1300 °С.

Поток энергии, подаваемый в печь струей пламени, при правильном размере и расположении горелок, позволяет достичь оптимально равномерного распределения температуры.

Круговой нагрев, несмотря на режим вкл./выкл. каждой горелки, обеспечивает квазипостоянную регулировку подачи тепловой энергии.

У рекуперативных горелок относительный предварительный нагрев воздуха находится в диапазоне от 0,6 до 0,8, что выше, чем у системы с центральным рекуператором (менее 0,5). При использовании ступенчатого горения эмиссия NO_2 может быть значительно снижена.

Выводы

Выполнена сравнительная оценка эффективности применения высокоскоростной рекуперативной горелки ГСР-150КР и зарубежных аналогов по показателям: коэффициент полезного действия рекуператора и коэффициент использования тепла для печи, оборудованной этими горелками.

В результате было аргументированно доказано, что высокоэффективные горелки ГСР-150КР, рекомендованные к установке на кузнечной печи камерного типа, позволят экономить примерно на 10 % больше газового топлива в сравнении с рекуперативными горелками, которыми оснащены данные тепловые агрегаты в настоящий момент.

Всесторонне проработаны вопросы, связанные с управлением высокоскоростными рекуперативными горелками, и проведено сравнение ориентировочных показателей инвестиций в нагрев газом и электричеством в применении для высокотемпературных процессов. Сравнение показало преимущества газового нагрева, так как удельные затраты на электроток почти втрое выше, чем для газа, и экономия в год на 1 кВт мощности – 45 евро при использовании высокоскоростных рекуперативных горелок.

Список литературы

1. Павловец, В.М. Рекуператоры для промышленных печей: учеб. пособие. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2012. – 218 с.
2. Теория тепломассообмена: Учебник для вузов / С.И. Исаев [и др.]; под ред. С.И. Исаева. – 3-е изд. испр. и доп. – М.: МГТУ, 2018. – 464 с.
3. Jouhara, H. Waste heat recovery technologies and applications // Thermal Science and Engineering Progress. – 2018. – No.6. – P. 268-289.
4. Ceramic heat pipes for high temperature application / N. Hack [et al.] // Energy Procedia. – 2017. – No.120. – P. 140-148.
5. Caillat, S. Burners in the steel industry: utilization of by-product combustion gases in reheating furnaces and annealing line // Energy Procedia. – 2017. – No.120. – P. 20-27.
6. Рекуперативные газовые горелки ECOMAX // LBE Elster Gmbh. – 2015. – 10 с.
7. Рекуперативные горелки RECUFIRE // Industrie-Brenner-Systeme GmbH. – 2015. – 8 с.
8. Бурокова, А.В. К вопросу рекуперации теплоты газов печей термообработки металлических изделий / А.В. Бурокова, Ю.А. Рахманов // Научный журнал НИУ

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – Екатеринбург: Университет ИТМО, 2014. – №1. – С. 210-220.

V.V. Kashayev /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

CONTROL OF RECUPERATIVE BURNERS IN THE FORGE FURNACE OF CHAMBER TYPE

Background. *One of the most critical problems in the industrial operation of chamber type forge furnaces is to increase the energy efficiency of such a thermal aggregate. Most of the furnaces of this type with waste gases lose more than 50 % of the thermal energy potential. Therefore, in this situation, the potential for energy saving is very significant, and the executive use of such potential will make it possible to reduce the costs of metallurgical enterprises significantly.*
Materials and/or methods. *The task is to assess the effectiveness of the use of high-speed recuperative burner in forge furnaces using a new high-speed recuperative burner and to study the features of controlling such burners in furnaces, as well as to analyse the power and cost of different recuperative burners. In order to fully ensure all the necessary parameters of the quality of heating of billets and to increase the energy efficiency of forge furnaces, it is necessary to use new burner devices which will give uniform heating of all the billets in the furnace, which is especially suitable for forge furnaces of chamber type. Given all the features of the new high-speed recuperative burner, it is especially important to consider all aspects of controlling high-temperature combustion, i.e. the operation of modern high-speed recuperative burners in forge furnaces.*
Results. *A comparative evaluation of the efficiency of high-speed recuperative GSR-150KR burner and foreign analogues on the efficiency of the recuperator and the heat utilisation factor for the furnace equipped with these burners. The evaluation showed that GSR-150KR burners recommended to install on the forge furnace chamber type will save about 10 % more gas fuel compared with recuperative burners. The analysis of features of control of high-speed recuperative burners carried out.*
Conclusion. *In addition, a comparison of the investment indicators for gas and electricity heating for high-temperature processes made, which demonstrated the advantages of heating with gas fuel, since the specific cost of electricity is almost three times higher than for gas, and the annual savings of 1 kW of power will be about 45 euro when using new high-speed recuperative burners.*

Keywords: *forge furnace, high-speed recuperative burner.*

Сведения об авторе
В.В. Кашаев
SPIN-код: 6575-3376
ORCID iD: 0000-0002-1446-803X
Researcher ID: A-3228-2016
Телефон: +380 (71) 435-20-19
Эл. почта: mar_70_70@mail.ru

Статья поступила 11.03.2019 г.
© В.В. Кашаев, 2019
Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров

УДК 621.771.001.57

А.В. Яковченко /д.т.н./, С.А. Снитко /д.т.н./, В.В. Пилипенко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
Н.И. Ивлева

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ ЧЕРНОВЫХ БАНДАЖЕЙ И ФЛАНЦЕВ

Разработаны метод и специализированная компьютерная программа проектирования профилей черновых бандажей и фланцев. В автоматизированном режиме предусмотрен расчет основных параметров кольцевых изделий и контуров их сечений, их контрольное построение, а также выполнение чертежа с автоматической простановкой размеров. Автоматизация процесса проектирования позволяет повысить производительность труда калибровщиков и технологов и улучшить качество чертежей.

***Ключевые слова**: профили черновых бандажей и фланцев, номинальный припуск, поле допуска на прокатку, автоматизированное проектирование, расчет основных параметров кольцевых изделий и контуров их сечений.*

Постановка проблемы

Проектирование профилей черновых бандажей и фланцев занимает значительную часть в объеме работ калибровщика при создании технологии их производства. В процессе разработки калибровки, вначале, на основе контура сечения чистового механически обработанного бандажа или фланца и заданных номинальных припусков, выполняется проектирование соответствующего чернового профиля по номинальным размерам. Затем на этой основе разрабатывается контур с учетом требуемой части поля допуска на прокатку по каждому размеру. После учета температурного расширения металла получают контур, который, по сути, является калибровкой по «металлу», который обеспечивает проектирование калибровки валков и соответственно контуров ручьев, нарезаемых в валках. Поэтому актуально создать метод и специализированную компьютерную программу автоматизированного проектирования профилей черновых бандажей и фланцев.

Анализ последних исследований и публикаций

В последние годы активно развиваются методы компьютерного проектирования технологий обработки металлов давлением [1…3]. Актуальным является направление, связанное с созданием методов автоматизированного проектирования сложных фасонных профилей, как основа автоматизированного проектирования калибровок деформирующего инструмента.

Для условий кольцепрокатного и бандажепрокатного производства эти методы не созданы.

Метод и программа проектирования профилей чистовых механически обработанных бандажей и фланцев, в том числе расчета основных параметров кольцевых изделий и контуров их сечений, их контрольное построение, а также вычерчивание, созданы в работе [4]. Цифровая информация об указанных контурах, представленная в виде координат точек сопряжений, координат точек центров дуг и значений радиусов этих дуг, является исходной информацией при проектировании профилей черновых бандажей и фланцев. Представляет интерес также работа [5], в которой предложены метод и программа проектирования контуров сложных фасонных в сечении колец. Математическая модель, на основе которой выполняется сопряжение прямых с дугами окружностей или дуг окружностей между собой и, соответственно, проектируется фасонный профиль, разработана в [6]. Практика автоматизированного проектирования сложных профилей железнодорожных колес также представлена в работе [6]. Предложенные в перечисленных публикациях методы целесообразно использовать и в настоящей работе.

Цель (задачи) исследования

Целью работы является создание специализированной компьютерной программы автоматизированного проектирования профилей черновых бандажей и фланцев. Для этого требуется разработка метода и алгоритма решения задачи, в том числе создание схем черновых бандажей и фланцев, моделей окон программы, а также определение порядка ввода исходной информации, вывода результатов расчета и выполненных чертежей.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Основной материал исследования

Предусмотрено два варианта проектирования: по заданным размерам и на основе чистового профиля. Если все требуемые размеры имеются на чертеже заказчика, то проектирование выполняется по первому варианту, который не отличается от проектирования чистовых механически обработанных бандажей и фланцев [4]. Основным является второй вариант, который рассмотрим подробно.

При проектировании чернового профиля в холодном состоянии в окне «выбор режима работы» [4] значение коэффициента температурного расширения металла задается равным единице (при проектировании калибровок с учетом температуры нагрева металла указанный коэффициент выбирается из диапазона 1,013…1,02). Также задается плотность металла в холодном состоянии.

Предусмотрено проектирование в режимах: «расчет по номинальным размерам с простановкой на чертеже допусков» и «расчет с учетом поля допусков». По второму режиму в окошке «допуски» [4] необходимо указать коэффициенты $k1$, $k2$. Коэффициент $k1$ изменяется в диапазоне 0…1 и характеризует величину поля допусков (например, при $k1=0$ выполняется проектирование по наименьшим размерам профиля, при $k1=1$ – по наибольшим размерам профиля, при $k1=0{,}5$ – с учетом среднего поля допусков). Коэффициент $k2$ изменяется в диапазоне 0…1 и характеризует долю поля допуска, распределенную на внутреннюю сторону бандажа (например, при $k2=0$ допуск распределяется только на наружную сторону, при $k2=1$ – только на внутреннюю сторону, при $k2=0{,}5$ – учитывается равномерное распределение допуска).

Сущность метода автоматизированного проектирования профилей черновых бандажей (рис. 1…4) заключается в следующем.

По различным элементам профиля задаются номинальные припуски, определяемые припусками на механическую обработку и допускаемыми отклонениями. Припуски назначают с целью устранения дефектного слоя металла и обеспечения требуемых размеров (по поверхности катания – 6…10 мм; по боковым поверхностям профиля – 3…5 мм (на каждую сторону). Указанные значения приняты по аналогии с данными [6].

С учетом используемых на практике вариантов калибровок валков и типов прокатываемых бандажей разработано 10 различных схем для задания номинальных припусков, которые отличаются конфигурацией чистовых и черновых бандажей, а также системами простановки размеров.

Порядок задания номинальных припусков по контуру бандажа определен разработанной схемой, показанной в окне программы (рис. 1). Здесь показаны точки, в которых нормируются номинальные припуски. Их значения, а также ряд дополнительных размеров указываются в вертикально расположенной таблице.

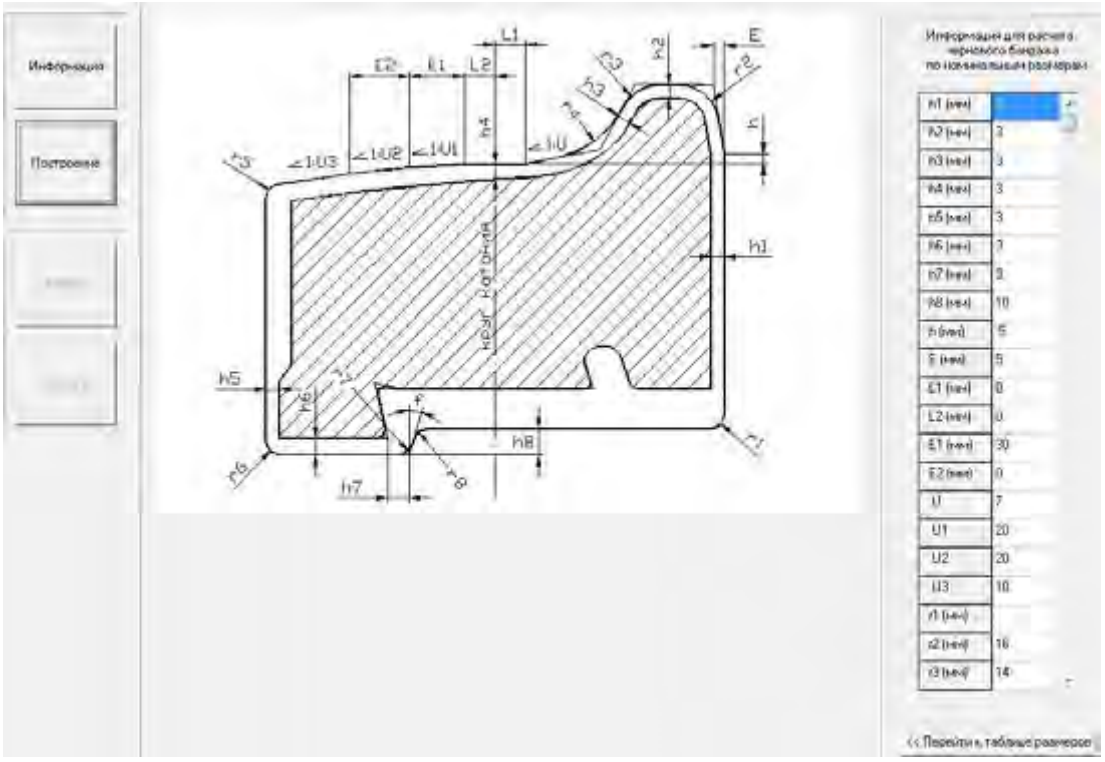


Рис. 1. Окно задания припусков для построения контура чернового бандажа

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

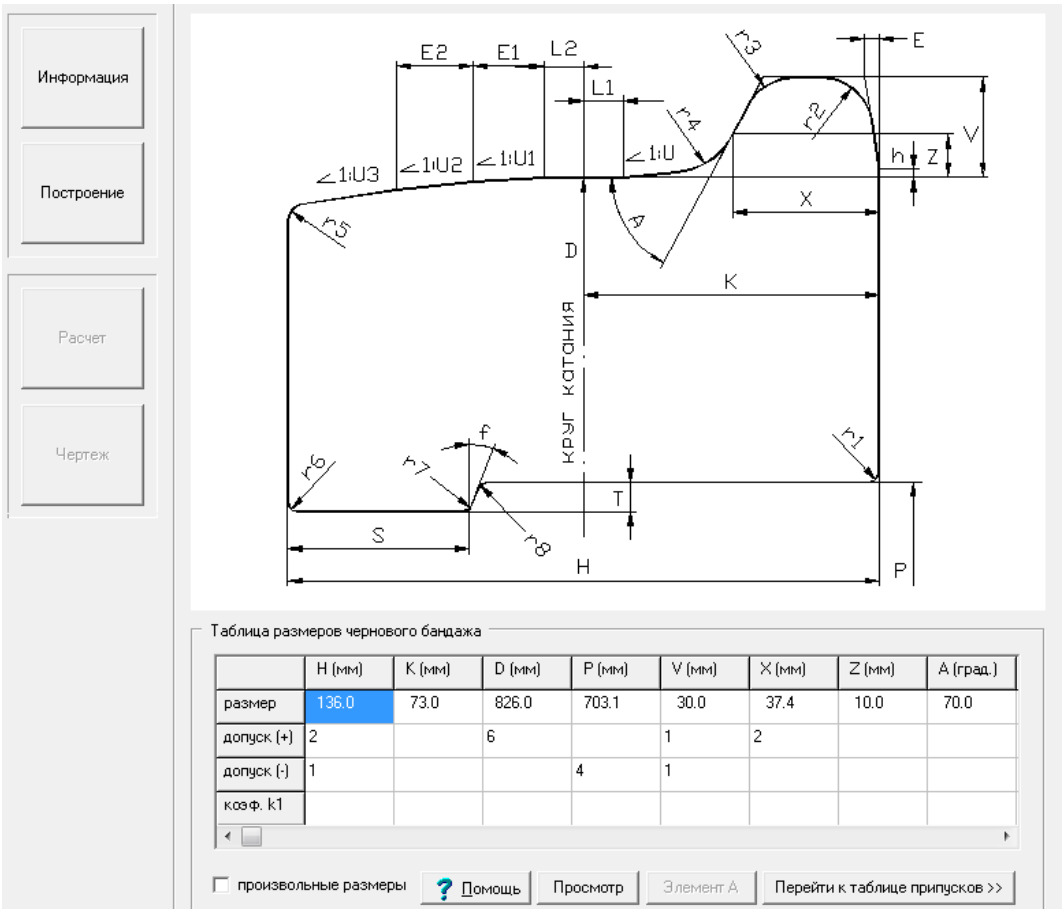


Рис. 2. Окно задания полей допусков на прокатку чернового бандажа

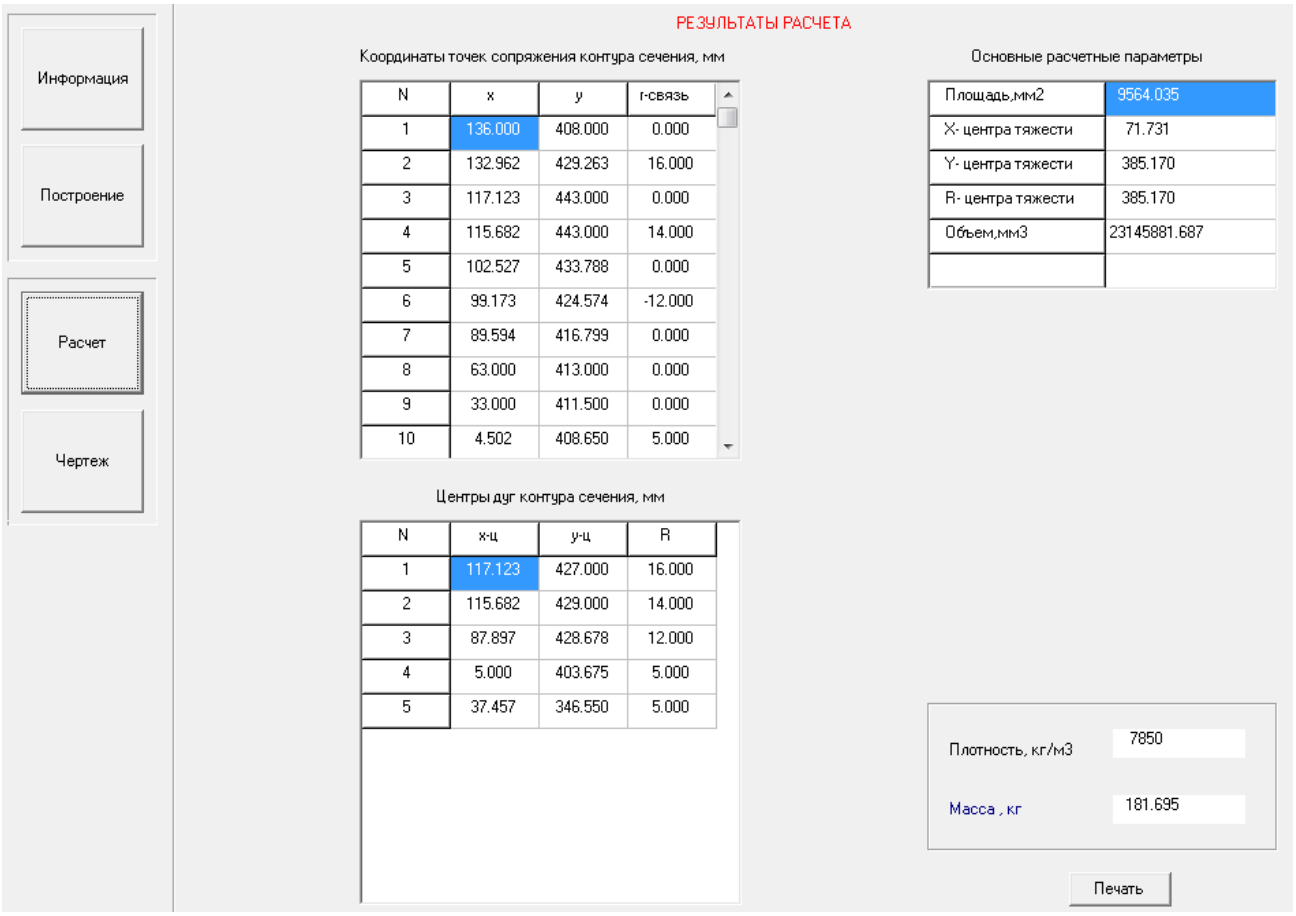


Рис. 3. Результаты расчета основных параметров чернового бандажа и контура его сечения

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

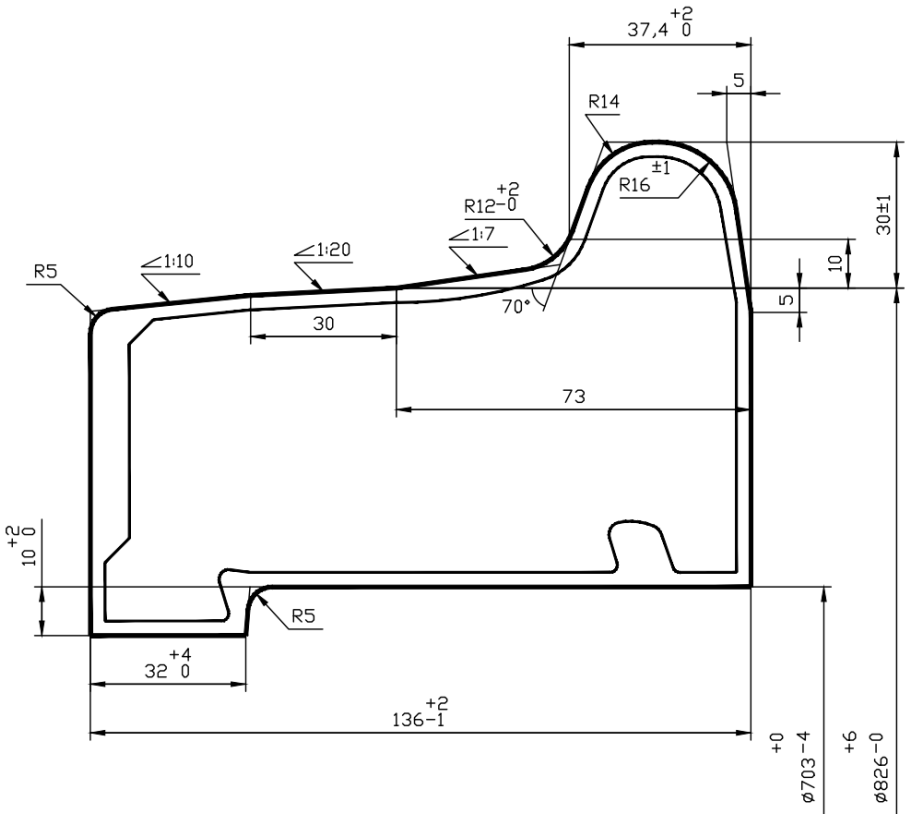


Рис. 4. Проектирование в автоматизированном режиме профиля чернового бандажа по номинальным размерам с вписанным контуром чистового бандажа

После задания всей требуемой информации выполняют проектирование профиля чернового бандажа по номинальным размерам. Цифровая информация об указанном контуре в виде координат точек сопряжений, координат точек центров дуг и значений радиусов этих дуг рассчитывается на базе моделей [6] и аналогичной информации по контуру чистового бандажа. Следующее окно программы (рис. 2) становится доступным после нажатия кнопки «перейти к таблице размеров» в предыдущем окне (рис.1). В нем под схемой бандажа предусмотрена таблица, в которую автоматически заносятся его номинальные размеры. Они автоматически рассчитываются программой на основе соответствующих размеров чистового бандажа и заданных номинальных припусков. Для обзора всей таблицы служит горизонтальная полоса прокрутки. Допуски на прокатку задаются в таблицу (рис. 2) для тех размеров, у которых они предусмотрены. По остальным соответствующие ячейки остаются пустыми. В последней строке таблицы для любого из размеров, имеющих поле допуска, можно задать индивидуальный коэффициент $k1$, отличающийся от базового значения, установленного ранее.

Любой размер чернового бандажа, вычисленный автоматически, может быть изменен калибровщиком (см. рис.2). В этом случае, чтобы исключить автоматический перерасчет размеров, необходимо установить флажок в окне «произвольные размеры». Снятие флажка позволяет вернуться к прежнему режиму расчета.

После задания всей требуемой информации выполняют контрольное построение профиля чернового бандажа по номинальным размерам или с учетом требуемой части полей допусков, а затем после его просмотра получают и анализируют результаты расчетов (см. рис. 3) и чертеж (см. рис. 4), который выполняется с автоматической простановкой размеров.

Если в процессе задания информации была допущена ошибка, то контур сечения бандажа будет построен в искаженном виде. В этом случае можно вернуться к ранее заданной информации для ее корректировки.

Рассмотрим также порядок автоматизированного проектирования профилей черновых фланцев с наружным и внутренним гребнем (рис. 5…7). На указанных рисунках представлены разработанные модели окон программы и результаты проектирования.

С учетом используемых на практике вариантов калибровок валков и типов прокатываемых фланцев разработаны три различные схемы для задания номинальных припусков, которые отличаются конфигурацией чистовых и черновых фланцев, а также системами простановки размеров.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

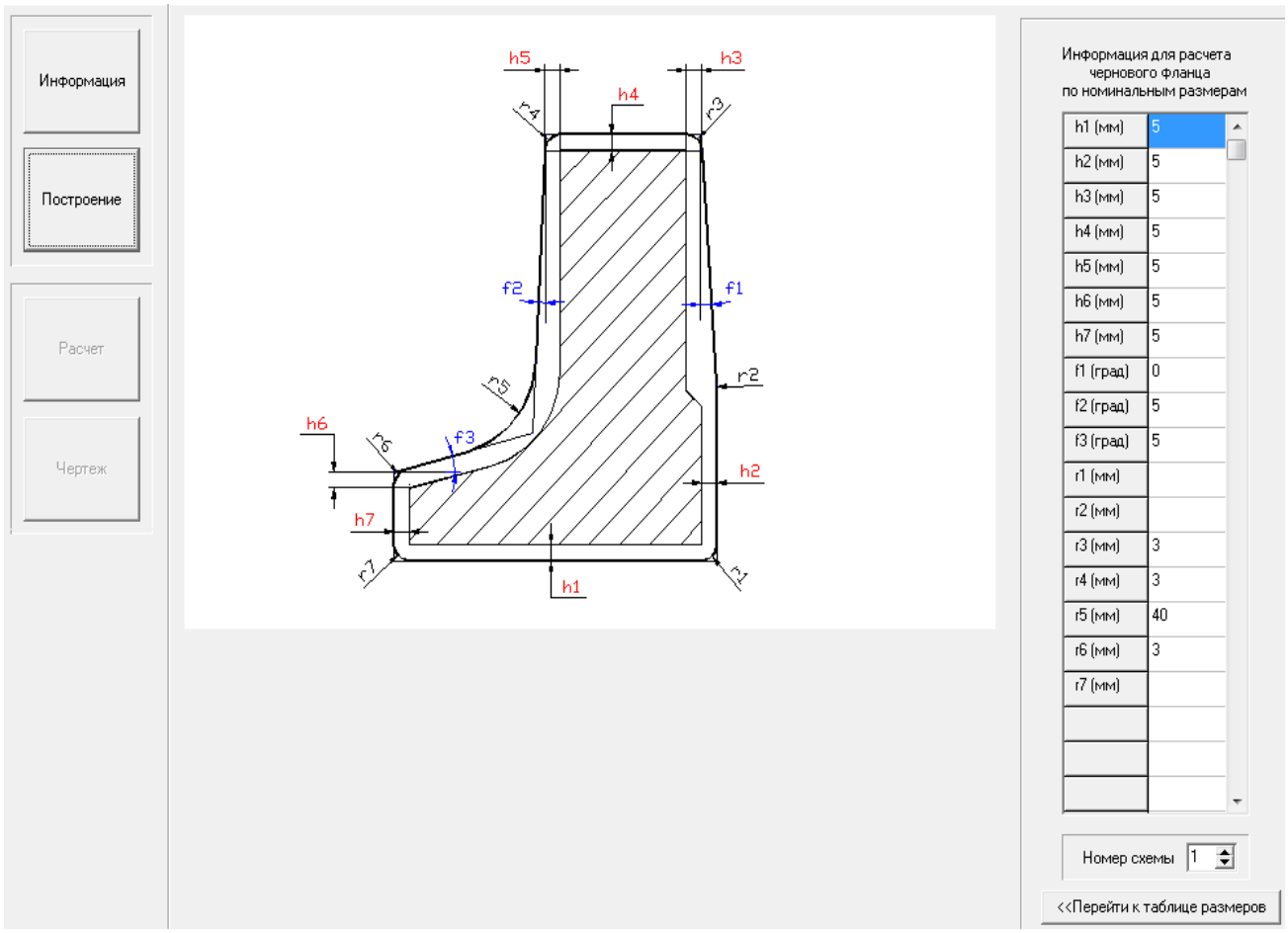


Рис. 5. Окно задания припусков для построения контура чернового фланца

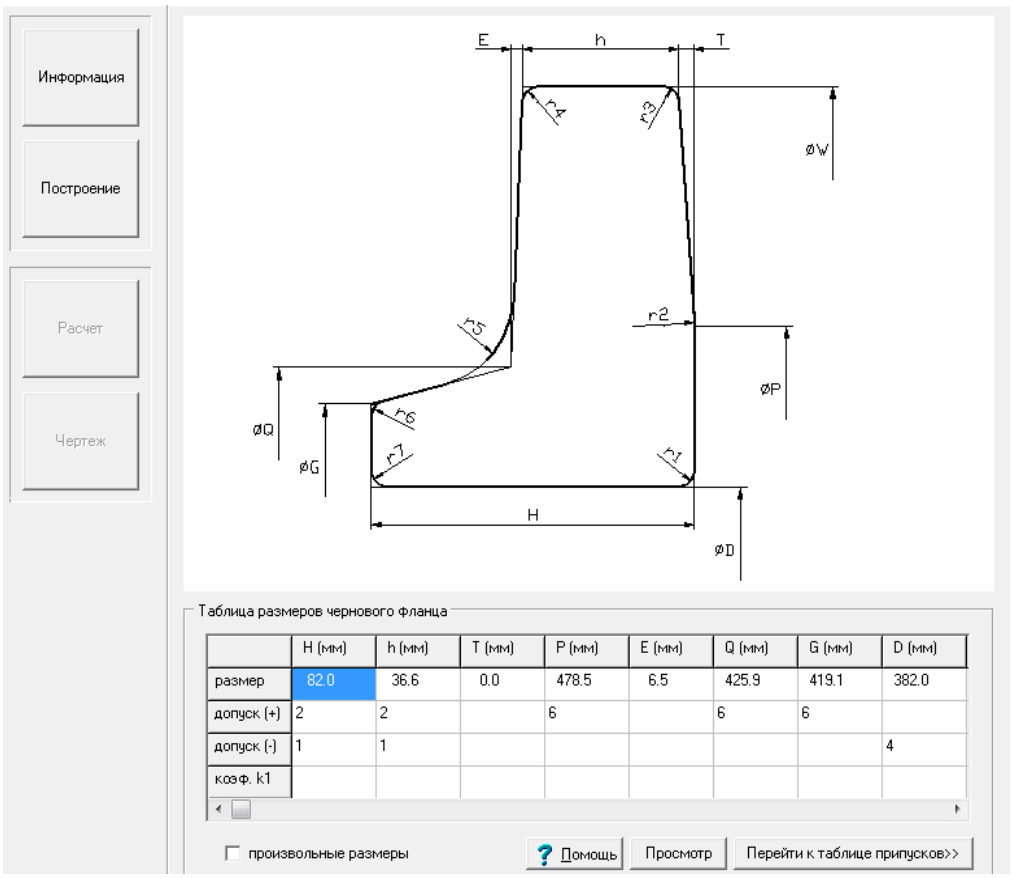


Рис. 6. Окно задания полей допусков на прокатку чернового фланца

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

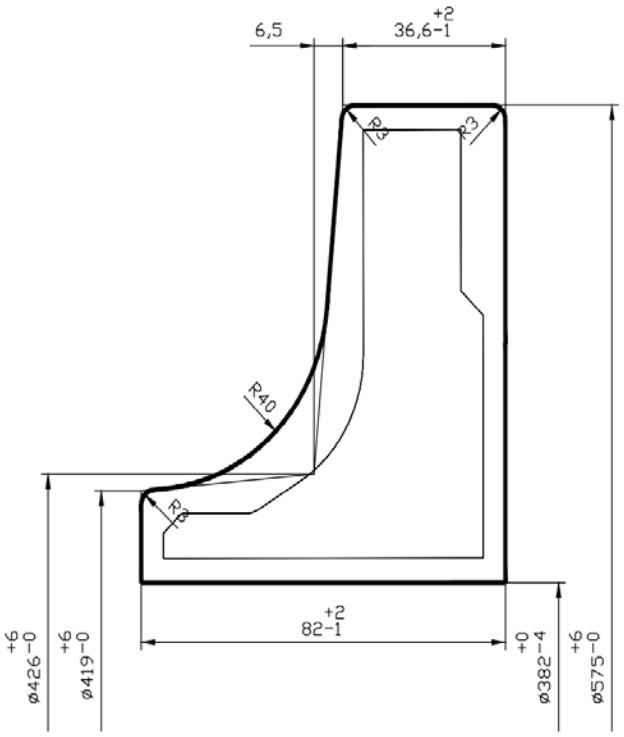


Рис. 7. Проектирование
в автоматизированном режиме профиля
чернового фланца по номинальным размерам
с вписанным контуром чистового фланца

Порядок задания номинальных припусков по контуру фланца определен разработанной схемой, показанной в окне программы (рис. 5). Здесь показаны точки, в которых нормируются номинальные припуски.

Их значения, а также ряд дополнительных размеров указываются в вертикально расположенной таблице. После задания всей требуемой информации выполняют проектирование профиля чернового фланца по номинальным размерам.

Следующее окно программы (рис. 6) становится доступным после нажатия кнопки «перейти к таблице размеров» в предыдущем окне (рис. 5). В нем под схемой фланца предусмотрена таблица, в которую автоматически заносятся его номинальные размеры. Они автоматически рассчитываются программой на основе соответствующих размеров чистового фланца и заданных номинальных припусков. Для обзора всей таблицы служит горизонтальная полоса прокрутки. Допуски на прокатку задаются в таблицу (рис. 6) для тех размеров, у которых они предусмотрены. По остальным соответствующие ячейки остаются пустыми.

В последней строке таблицы для любого из размеров, имеющих поле допуска, можно задать индивидуальный коэффициент $k1$, отличающийся от базового значения, установленного ранее.

Любой размер фланца, вычисленный автоматически, может быть изменен калибровщиком конструктивно по его усмотрению (рис. 6). В этом случае, чтобы исключить автоматический перерасчет размеров, необходимо установить флажок в окне «произвольные размеры». Снятие флажка позволяет вернуться к прежнему режиму расчета.

После задания всей требуемой информации выполняют контрольное построение профиля чернового фланца по номинальным размерам или с учетом требуемой части полей допусков, а затем после его просмотра получают и анализируют результаты расчетов, аналогичные тем, что представлены для чернового бандажа на рис. 3, и чертеж (рис. 7), который выполняется с автоматической простановкой размеров.

Выводы

Разработаны метод и специализированная компьютерная программа проектирования профилей черновых бандажей и фланцев. На основе контура сечения чистового механически обработанного бандажа или фланца в два этапа выполняется проектирование соответствующего чернового профиля. Вначале получают контур, учитывающий заданные номинальные припуски. Затем задаются и учитываются допуски на прокатку.

Предусмотрен расчет основных параметров кольцевых изделий и контуров сечений, их контрольное построение, а также выполнение чертежей с автоматической простановкой размеров. Автоматизация процесса проектирования позволяет повысить производительность труда калибровщиков и технологов и улучшить качество чертежей.

Список литературы

1. Bhatt, M.R. An expert system of die design for multi stage deep drawing process / M.R. Bhatt, S.H. Buch // Procedia engineering: 11th international symposium on plasticity and impact mechanics, 11–14.12.2016, New Delhi (India). – New Delhi: Elsevier procedia, 2017. – Vol.173. – P. 1650-1657.
2. Design and manufacturing of a straight bevel gear in hot precision forging process using finite volume method and CAD/CAE technology / S. Khalilpourazary [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – No.56 (1). – P. 87-95.
3. Development of a CDA/CAM system for the closed-die forging process / M. Jolgaf [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – No.138. – P. 436-442.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

4. Метод автоматизированного проектирования профилей механически обработанных бандажей и фланцев / А.В. Яковченко [и др.] // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – Луганск: изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2017. – №4(21) – С. 38-53.
5. Метод автоматизированного проектирования профилей фасонных в сечении колец фланцев / А.В. Яковченко [и др.] // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – Луганск: изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2018. – №1(22). – С. 10-18.
6. Яковченко, А.В. Проектирование профилей и калибровок железнодорожных колес: монография / А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева, Р.А. Голышков. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2008. – 491 с.

A.V. Yakovchenko /Dr. Sci. (Eng.)/, S.A. Snitko /Dr. Sci. (Eng.)/, V.V. Pilipenko
Donetsk National Technical University (Donetsk)
N.I. Ivleva

THE METHOD FOR AUTOMATED DESIGN OF ROUGH PROFILES OF BANDAGES AND FLANGES

Background. *Currently, there is a trend of automation of labour in the processing of metal by pressure. Designing profiles of rough bandages and flanges takes a significant part of the time in the scope of work of the calibrator. Therefore, the actual task is to create a method and a specific computer program for their computer-aided design.*
Materials and/or methods*. The method for automated design is that based on the contour of the finished mechanically processed bandage or flange, the design of the draft product is carried out in two stages. At the first stage, the nominal machining allowances and tolerances assigned. At the second – the tolerances for rolling assigned. Next, a draft profile built.*
Results. *Based on the method developed a specific computer-aided design program, which allows calculating the basic parameters of rough bandages and flanges, their construction control, perform a drawing with automatic dimensioning. The information obtained is the basis for the subsequent design of the deforming tool calibrations.*
Conclusion. *The developed method and program allow performing the design of rough bandages and flanges in an automated mode which will improve the quality of the designs and the productivity of calibrators and engineers.*

Keywords: *profiles of rough bandages and flanges, nominal allowance, tolerance for rolling, computer-aided design, calculation of the main parameters of ring products and their section contours.*

Сведения об авторах

А.В. Яковченко
SPIN-код: 1314-1795
Author ID: 850425
ORCID iD: 0000-0003-2320-9504
Телефон: +380 (71) 334-82-35
Эл. почта: mond1991@mail.ru

В.В. Пилипенко
Телефон: +380 (71) 414-20-36
Эл. почта: VictorPilipenkoDNTU@gmail.com

С.А. Снитко
SPIN-код: 8463-3786
Author ID: 844696
ORCID iD: 0000-0002-1099-5801
Телефон: +380 (71) 420-66-39
Эл. почта: snitko_sa@mail.ru

Н.И. Ивлева
Телефон: +380 (62) 304-33-77
Эл. почта: ivl22@mail.ru

Статья поступила 17.04.2019 г.
© А.В. Яковченко, С.А. Снитко, В.В. Пилипенко, Н.И. Ивлева, 2019
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько

УДК 662.7:552.57

Л.Ф. Бутузова /д.х.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», ГУ «ИнФОУ» (Донецк)
В.Н. Шевкопляс /к.х.н./
ГУ «Институт физико-органической химии и углехимии (ИнФОУ)» (Донецк)
В.А. Колбаса, Г.Н. Бутузов /к.х.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

РАДИКАЛЫ БУРЫХ УГЛЕЙ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ В ПРОЦЕССЕ ХИМИЧЕСКОЙ И ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Методами ЭПР и DRIFT-спектроскопии проведено детальное изучение влияния температуры, времени, концентрации щелочи на процессы радикалообразования и функциональный состав бурых углей до и после их химической обработки. Показано, что удаление гуминовых кислот способствует более плотной упаковке структурных элементов в органической массе топлив. Результатом щелочной обработки является увеличение прочности межмолекулярных взаимодействий, увеличение доли карбонильных групп и ароматического водорода в остаточном угле, что приводит к увеличению размеров системы полисопряжения и, как следствие, к изменению концентрации парамагнитных центров, времени спин-спиновой релаксации и ширины сигнала ЭПР. Величина концентрации парамагнитных центров (ПМЦ) определяется совокупностью факторов, обеспечивающих стабилизацию семихинонных анион-радикалов: щелочная среда, размеры областей полисопряжения, прочность межмолекулярных взаимодействий.

Ключевые слова: *уголь, ПМЦ, функциональные группы, семихиноны, полукоксование.*

Постановка проблемы

Рациональное использование энергетических углей предполагает их предварительную обработку, направленную на получение как энергетического, так и технологического сырья.

В разработке новых методов переработки топлив важное значение имеют теоретические основы химии твердых горючих ископаемых, дающие сведения о структуре органической массы угля (ОМУ) и их реакционной способности в процессах термической и химической деструкции, которые протекают с участием свободных радикалов, фиксируемых методом ЭПР.

Анализ последних исследований и публикаций

Выяснению природы ПМЦ твердых топлив посвящено большое количество работ. Однако мало внимания уделено изучению влияния химических реагентов на парамагнитные характеристики ОМУ [1…6].

Общепринятой является концепция о радикалоподобных структурах, стабилизированных резонансным взаимодействием в ароматических фрагментах ОМУ [7,8]. Эта концепция подтверждается экспериментальными данными об увеличении концентрации ПМЦ в процессах углефикации и пиролиза.

Динамика поведения ПМЦ описывается теорией Провоторова. При отсутствии резервуара спинов концентрация ПМЦ мала, а подвижность их высока [9]. Молодые угли, прежде всего, бурые, сернистые содержат большое количество гетероатомов кислорода и серы, входящих в состав соответствующих функциональных групп и органо-минеральных соединений. ПМЦ таких углей отличаются высокой реакционной способностью и чувствительностью к химической обработке [10].

Результаты анализа спектров ЭПР углей [11] показали, что их сигнал может быть разделен на отдельные компоненты, которые насыщаются при разных уровнях СВЧ мощности. Амплитуды отдельных компонентов возрастают с увеличением микроволновой мощности до точки насыщения, а затем уменьшаются, что типично для гомогенно расширяющихся линий, относящихся к одному типу ПМЦ.

Как правило, в углях различают 3 типа сигналов:

$ПМЦ_1$ – узкий H=0,5…0,15 Гц; g-фактор≈2,0025 относят к свободным валентностям в сильно конденсированных системах;

$ПМЦ_2$ – широкий H≈5 Гц; g-фактор≈2,0030 относят к свободным валентностям в менее конденсированных структурах;

$ПМЦ_3$ – широкий H≈7 Гц; g-фактор≥2,0040 относят к кислородсодержащим радикалам.

Ранее авторами представлены экспериментальные данные, показывающие, что реакцион-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ные центры, ответственные за развитие термических превращений молодых углей, представляют собой радикалы углеводородного и феноксильного типов. Последние в ЭПР-спектрах дают сигналы, имеющие g-фактор≈2,0035, что указывает на локализацию электронов на атомах кислорода [5].

Ширина сигнала, по данным [12,13], не зависит от содержания углерода, а g-фактор возрастает при увеличении содержания гетероатомов (N+O+S).

Эти данные свидетельствуют о том, что интенсивность радикалообразования при пиролизе углей во многом зависит от доли кислородсодержащих фрагментов в их органической массе. Наиболее богатыми кислородом компонентами бурых углей и окисленных каменных углей являются гуминовые кислоты, представляющие собой высокомолекулярные ароматические оксикарбоновые кислоты, извлекаемые водными растворами щелочей. Следовательно, предварительная обработка углей щелочью позволит изменить их парамагнитные характеристики и реакционную способность.

Ранее в работах [14,15] было установлено активирующее действие добавок неорганических веществ разных классов на процессы термической деструкции бурых углей. Показано, что максимальная глубина превращения ОМУ в жидкие и газообразные вещества в идентичных условиях достигается именно в присутствии щелочей и кислот. Эффективность действия щелочей описана в таких процессах, как окисление углей кислородом воздуха в щелочной среде [16]; химическая активация углей путем их кипячения с концентрированными растворами щелочей и кислот с целью получения адсорбентов [17]; обработка растворами щелочей для извлечения гуминовых кислот [18]; обработка углей смесью метанол/щелочь при температуре 300…350 °С с целью увеличения степени растворения [19]; обработка растворами щелочей и кислот с целью деминерализации и десульфурации ОМУ [20].

Таким образом, важным направлением в изучении парамагнетизма молодых углей является анализ влияния чувствительности их ПМЦ к химической обработке различными реагентами. При этом особенно информативными являются данные по изучению щелочной обработки, позволяющей выделить растворимые в щелочи гуматы натрия, которые обогащены кислородсодержащими функциональными группами (КФГ), и оценить вклад этой составляющей в процессы, протекающие при переработке топлив. В практическом плане такая обработка позволит получить ценный для сельского хозяйства, медицины и др. дополнительный продукт – гуминовые кислоты (ГК) и не гидролизуемый щелочью остаточный уголь (ОУ) – энергетическое сырье.

В работе [21] обнаружено появление сигналов нового типа при химической модификации бурого угля, но природа этих сигналов не установлена, не рассмотрено влияние всех факторов, действующих на систему в процессе термохимической деструкции ОМУ.

В связи с вышеизложенным, весьма интересным является детальное изучение влияния температуры, времени, концентрации щелочи на процессы радикалообразования в молодых углях.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящего исследования является получение информации о природе ПМЦ, образующихся при химической обработке бурых углей в различных условиях, а также оценка влияния гуминовых составляющих топлива на их парамагнитные характеристики и поведение в процессе пиролиза, основываясь на свободнорадикальном механизме пиролитических превращений.

Основной материал исследования

В качестве объекта исследования использовали образцы Канско-Ачинского бурого угля – КАБ (C^{daf} – 73,3; H^{daf} – 4,7; S^{d}_{t} – 0,38; W^{a} – 9,6; A^{d} – 5,8; V^{daf} – 49,1 %) и Днепровского бурого угля Александрийского месторождения – ДБУ (C^{daf} – 68,6; H^{daf} – 6,2; S^{daf} – 4,7; A^{d} – 27,6; W^{a} – 6,5; V^{daf} – 62,4 %).

Химическую обработку исходных углей проводили путем их однократной экстракции раствором едкого натра при комнатной температуре и при температуре 100 °С на кипящей водяной бане. Время нагревания варьировали в течение 4…6 часов с последующим фильтрованием, сушкой при комнатной температуре и вакуумированием до остаточного давления 0,1 МПа.

Влияние концентрации раствора щелочи на парамагнитные характеристики углей и полукоксов исследовали путем смачивания навески растворами NaOH постоянного объема, но разной концентрации (соотношение Т:Ж=1-0,4:1 вес. частей) в течение 20 час., вакуумирования до остаточного давления 0,1 МПа с последующим пиролизом углей во вращающемся автоклаве (скорость нагрева – 10 град./мин) до заданной температуры с изотермической выдержкой при конечной температуре в течение 3 час.

Запись ЭПР-спектров образцов и эталона проводили на радиоспектрометре РЭ-1306 в

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

3-сантиметровом диапазоне длин волн при комнатной температуре на воздухе. В качестве внутреннего стандарта использовали порошок Mn^{2+} в решетке MgO. Зависимость ширины и формы спектров ЭПР от уровня СВЧ-мощности исследовалась при следующих условиях**:** мощность СВЧ ≤ 20 дБ; развертка поля – 100Э; усиление – 0,5·0,1; скорость развертки – 10·1 Э/мин; ВЧ модуляция – 0,3·0,01.

В табл. 1 представлены парамагнитные характеристики исходного и химически обработанного – остаточного угля Канско-Ачинского бассейна. Как видно из таблицы, химическая обработка приводит к значительному изменению парамагнитных характеристик топлива.

Чтобы разделить влияние температуры, времени и типа обработки на образование различных ПМЦ, было изучено действие щелочей в течение 4…6 часов при нагревании на водяной бане и при комнатной температуре, а также кипячение угля с водой. Как видно из табл. 1, даже при кипячении с водой наблюдается увеличение концентрации ПМЦ в ОМУ при незначительных изменениях значений ширины линии и времени спин-спиновой релаксации. Обработка щелочью при комнатной температуре уже приводит к увеличению g-фактора до 2,0043, хотя остальные характеристики практически не меняются. Форма линии остается Лоренцевой, что говорит о наличии сильного обменного взаимодействия.

Проведенные ранее исследования показали, что в температурном интервале 20…460 °С физико-химически связанная вода активно взаимодействует с ОМУ [22]. Количество этой влаги влияет на скорость реакций образования и гибели ПМЦ. Даже в сравнительно мягких условиях (кипячение при 100 °С) происходит гидролитическое расщепление эфирных групп, образование кислых групп. Разрушение эфирных мостиков, являющихся агентами поперечных связей между ароматическими ядрами, приводит к образованию дополнительного количества КФГ-групп [5].

Эти данные позволяют объяснить различия парамагнитных характеристик образцов исходного и обработанного водой угля тем, что в процессе аквагидролиза тип радикалов не меняется, но образуется дополнительное количество активных КФГ-групп – источников ароксильных анион-радикалов.

Сухое прокаливание угля при 100 °С (опыт №7) приводит к увеличению числа ПМЦ, ширины линии, величины g-фактора до 2,0043 и к уменьшению времени спин-спиновой релаксации по сравнению с непрокаленным углем. Сравнение опытов №2 и №7 наглядно показывает, что более стабильные радикалы образуются в присутствии воды. Кроме того, водная среда позволяет осуществляться по ионному механизму тем реакциям, которые невозможно осуществить свободно радикальным путем. Акватермолиз облегчает деполимеризацию и образование жидких продуктов термической деструкции [16,23].

Обработка угля при комнатной температуре соляной кислотой приводит к резкому увеличению времени спин-спиновой релаксации и уменьшению значений остальных парамагнитных характеристик.

В целом, введение в систему уголь – вода щелочей или кислот изменяет полярность связей и нарушает кислотно-основное равновесие.

Динамика накопления ПМЦ в щелочной среде имеет экстремальный характер. Следовательно, имеет место конкуренция двух процессов: возникновения и гибели ПМЦ. Щелочная обработка в течение 4-х часов приводит к максимальному увеличению параметров ΔN, ΔH и g-фактора по сравнению с аквагидролизом в воде.

При более длительном воздействии щелочи (опыты №5 и №6), по-видимому, достигается высокая концентрация радикалов и возможна их интенсивная рекомбинация.

Табл. 1. Парамагнитные характеристики исходного и химически обработанного угля КАБ

№ п\п	Способ обработки	Температура, время	Форма линии, симметрия	N, спин/г·10^{-18}	ΔN, спин/г·10^{-18}	g-фактор	H,Э	T_2, с·10^6
1	Исходный	-	Лоренцева, асим.	0,37	-	2,0038	6,3	2,6
2	H_2O	100 °С, 6 час.	Лоренцева, асим.	1,8	+1,43	2,0037	6,6	2,0
3	ОУ, NaOH	300 °К, 4 час.	Лоренцева, асим.	0,39	+0,02	2,0043	6,3	2,6
4	ОУ, NaOH	100 °С, 4 час.	Лоренцева с гауссовым уширением	3,9	+3,53	2,0047	7,1	4,1
5	ОУ, NaOH	100 °С, 5 час.	Лоренцева, асим.	2,2	+1,83	2,0046	6,6	4,5
6	ОУ, NaOH	100 °С, 6 час.	Лоренцева, асим.	0,58	+0,21	2,0038	6,6	4,3
7	-	100 °С, 6 час.	Лоренцева, асим.	1,0	+0,63	2,0043	6,6	1,4
8	HCl	300 °К, 24 час.	Лоренцева, сим.	0,22	- 0,15	2,0021	5,9	96,0

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Однако гибель радикалов в твердом теле заторможена и непосредственная их рекомбинация маловероятна. Можно предположить, что при длительной щелочной обработке образуются ЭПР-неактивные ионы или комплексы с переносом заряда.

Авторы работы [24] предоставили информацию, свидетельствующую о наличии в структуре молекул западносибирских гуминовых кислот устойчивых радикалов семихиноидного типа и металлоорганических комплексов. Как известно, важнейшим свойством комплексов в растворах является их устойчивость.

Образование указанных соединений, по-видимому, облегчает протекание реакций рекомбинаций и приводит к снижению числа ПМЦ, ширины линии и g-фактора до величины g-фактора исходного угля.

Кроме того, согласно протолитической теории гидроксиды щелочных металлов способны быть как донорами, так и акцепторами протона.

Следовательно, под их воздействием малорастворимые соединения могут переходить в раствор в виде иона.

Зависимость ширины и формы сигнала от уровня СВЧ-мощности показала, что в спектре исходного угля КАБ достоверно можно выделить один тип ПМЦ с коротким временем спин-спиновой релаксации и величиной g-фактора= =2,0038, т.е. его сигнал можно считать однородным [21].

Химическая обработка приводит к возникновению нового типа ПМЦ, отличающегося по времени релаксации. Вновь появившийся центр имеет время T_2 примерно одного порядка для исходного и обработанного щелочью углей, а для деминерализованного образца эта величина более чем на порядок выше. Важно отметить, что под действием щелочи сигнал исходного угля сохраняется, а под действием кислоты практически уничтожается.

Сигнал угля, обработанного щелочью, состоит из двух компонентов с разным значением g-фактора, которые насыщаются при разном уровне СВЧ-мощности, что обусловливает дополнительное уширение огибающей (экспериментальной) линии ЭПР.

Одновременно происходит существенное увеличение g-фактора до 2,0047, указывающее на преимущественную локализацию электронов на атомах кислорода.

Сигнал ЭПР деминерализованного образца уже, а количество ПМЦ почти на порядок меньше по сравнению образцами №4 и №5.

Эти данные позволяют сделать вывод о различии кислотной и щелочной обработки: при щелочной обработке возникает больше ПМЦ с короткими временами T_2, а при кислотной – больше центров с длинными временами T_2.

Для выявления природы ПМЦ, образующихся в разных условиях химической обработки, необходимо учитывать реакции гидролиза, приводящие к накоплению и расходованию КФГ; реакции ионного обмена, приводящие к разрушению водородных связей; процессы сольволиза; термические и окислительно-восстановительные превращения кислородсодержащих функциональных групп, а также образование и удаление растворимых гуматов. Все указанные реакции проходят с участием КФГ, основная масса которых присутствует в форме карбоксильных и фенольных гидроксилов [25,26].

Результаты определения концентрации КФГ в условиях настоящего эксперимента представлены в табл. 2.

Данные таблицы указывают на расходование эфирных, накопление гидроксильных, карбонильных групп и увеличение доли ароматических структур в щелочной среде. При этом прочность межмолекулярных взаимодействий ($C=O/CH_{алиф}$) максимальна в остаточном угле. Этот факт объясняет резкое увеличение количества ПМЦ после кипячения угля с щелочью тем, что структура ОУ становится более упорядоченной, несмотря на разрушение водородных связей при катионообмене и гидролиз поверхностных эфирных мостиков.

Гуминовые кислоты отличаются более низким относительным содержанием ОН-групп и ароматического водорода, но более высоким содержанием С=О- и С–О-групп по сравнению с исходным углем и ОУ. Этот факт указывает на протекание в ГК процессов образования эфиров.

Табл. 2. Отношение площадей под полосами поглощения различных функциональных групп в DRIFT-спектрах угля КАБ, ОУ и ГК

№ п\п	Способ обработки	OH/C=C	C=O/C=C	C-O/C=C	$H_{ар}$/C=C	$C=O/CH_{алиф}$
1	Исходный	4,02	0,61	0,28	0,21	3,90
2	NaOH, ОУ	5,14	0,73	0,25	0,97	5,47
3	ГК	3,02	0,78	0,49	0,12	3,82

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

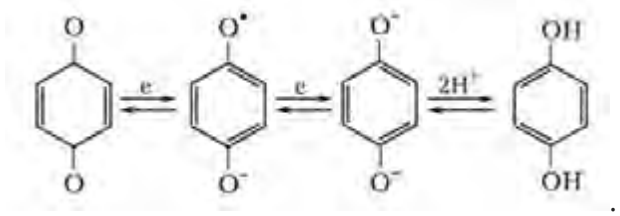
Удаление богатых кислородом ГК способствует более плотной упаковке структурных фрагментов. Устойчивость ПМЦ исследуемых образцов, очевидно, обеспечивается за счет делокализации электрона в системе полисопряжения, за счет межмолекулярных взаимодействий и образования более или менее стабильных анион-радикалов.

В соответствии с величиной g-фактора ПМЦ исходного угля могут быть отнесены к ароматическим радикалам с эфирным кислородом мостикового типа; g-фактор угля, обработанного щелочью, близок к g-фактору радикалов семихинонного типа. Значения g-фактора 2,0038, по мнению авторов работы [27], свидетельствует о наличии в этих углях радикалов ароксильного типа, неспаренные электроны которых частично локализованы на гетероатомах цепи сопряжения.

Эти данные прекрасно согласуются с результатами настоящего эксперимента, учитывая, что окислительно-восстановительные превращения в системе фенол-хинон полностью термодинамически обратимы, а при восстановлении хинонов в щелочной среде первой стадией является образование ион-радикалов семихинонов. Действительно, щелочная обработка приводит к значительному увеличению доли карбонильных групп в ОУ, концентрация которых примерно в 1,5 раза превышает долю алифатических групп (см. табл. 2). Кроме того, образование хинонов, в которых С=О-группы входят в систему полисопряжения, вносит значительный вклад в удлинение системы полисопряжения, а, следовательно, способствует стабилизации радикалов.

Изучение ряда семихиноновых радикалов индивидуальных ароматических соединений показало, что величины их g-фактора снижаются по мере возрастания числа ароматических колец в полисопряженной молекуле [28]. Для анион-радикала 9,10-антрасемихинона (2,0041) и 1,4-бензосемихинона (2,0047) величины, измеренные в замороженном растворе, близки к значениям g-факторов анизотропного сигнала угля в щелочной среде.

Семихиноны составляют самостоятельную группу анион-радикалов, являются промежуточными продуктами восстановления хинонов в щелочных средах и могут образовывать устойчивые ион-радикалы.



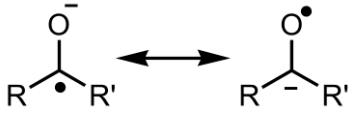
Эти доводы подтверждаются появлением сигнала с g-фактором 2,0043…2,0047 в процессе щелочного гидролиза ОМУ [29].

При погружении угля в раствор щелочи происходит замещение протона H^+ кислотных СООН- и ОН-функциональных групп на ион натрия и образование растворимых в щелочи гуматов натрия:

$$Гум - OH + NaOH \leftrightarrow Гум - {}^{-}O\,{}^{+}Na + H_2O.$$

На карбонильной группе >C-O^- образуется прочная ионная пара металл-кетил >C-ONa^+, которая отличается высокой стабильностью за счет стерического экранирования радикального центра и, очевидно, является основной причиной увеличения концентрации ПМЦ. Пространственное экранирование реакционной группы происходит под действием заместителей и/или сольватирующего растворителя [30]. Как правило, в сольвате происходит частичный перенос заряда с донора на молекулу акцептора и увеличение полярности реагирующей связи. Сольватация радикалов может снижать или увеличивать их реакционную способность в зависимости от того, образует ли радикал Н-связи с молекулами, с которыми он реагирует, или с другими молекулами. По-видимому, изменение свойств ПМЦ с увеличением времени щелочной обработки в опытах №4 и №6 объясняется именно влиянием перечисленных процессов.

Важно отметить, что для кетилов возможны две резонансные структуры с расположением анионного центра на атомах углерода и кислорода:



Часть функциональных групп находится не в H^+, а в катионной форме в виде нерастворимых солей кальция, магния, алюминия, бария, которые также участвуют в реакциях катионообмена:

$$Гум–(COO)_2Ca+NaOH\leftrightarrow Гум–COONa+Ca(OH)_2.$$

Изменение парамагнитных характеристик углей в нейтральной, кислой и щелочной среде показывает, что большая доля ПМЦ, образующихся под действием щелочи, связана с образованием ион-радикалов и их сольватацией (см. табл. 1).

Вышеизложенное наглядно показывает многофакторность процессов, приводящих к зарождению и гибели ПМЦ. Парамагнитные характеристики исследуемых образцов формируются в результате конкуренции процессов «стабилиза-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ции – гибели ПМЦ», с одной стороны, и процессов «разрушения – восстановления» межмолекулярных взаимодействий, с другой стороны.

В табл. 3 приведены парамагнитные характеристики исходного и химически обработанного Александрийского бурого угля (АБУ). Как видно из таблицы, стабильность образующихся ПМЦ в органической массе АБУ значительно ниже по сравнению с КАБ (см. табл. 1). Это сказывается на изменении параметров при химической обработке. Если в КАБ под действием щелочи происходит увеличение концентрации ПМЦ, то в ОУ АБУ наблюдается снижение величины N. Для обоих исследуемых углей удаление богатых кислородом гуматов натрия под действием щелочи приводит к уширению сигнала и увеличению значения g-фактора в сравнении с исходными углями. Это свидетельствует об однонаправленности происходящих процессов и образовании однотипных радикалов.

В целом влияние щелочной обработки на парамагнитные характеристики АБУ выражено слабее: величина ΔN в десятки раз ниже по сравнению с углем КАБ при практически одинаковых значениях ширины линии и g-фактора. Это объясняется различием в степени обуглероженности углей, выходе летучих веществ и сернистости.

Действие соляной кислоты на парамагнитные характеристики угля АБУ также слабее, чем для угля КАБ, несмотря на высокое содержание золы (27,6 %).

Максимальная концентрация ПМЦ наблюдается для ГК, а минимальная – для деминерализованного угля. Тенденция изменения параметров аналогична для двух серий экспериментов, приведенных в табл. 3.

В процессе термической деструкции углей в интервале температур полукоксования происходит накопление ПМЦ, уменьшается величина g-фактора, снижается вклад гауссовых компонентов в ЭПР-сигнал (табл. 4). Это связано с развитием процессов ароматизации и уменьшением относительного количества мостиковых О-групп (см. табл. 2) [5].

Одновременно происходит разрушение органоминеральных соединений. Последние, в частности гуматы натрия, также являются источником ПМЦ.

Для полукоксов, полученных в присутствии щелочи, характерно уменьшение всех парамагнитных характеристик. Эти данные объясняются тем, что термодеструкция в присутствие щелочи способствует протеканию реакций декарбоксилирования [14], т.е. уменьшения количества кислородсодержащих групп, экранирующих реакционноспособные радикалы.

Концентрация ПМЦ в полукоксе существенным образом зависит от количества введенной добавки: при увеличении концентрации щелочи число парамагнитных частиц возрастает до определенного предела, соответствующего 5% раствору, а затем уменьшается.

Табл. 3. Парамагнитные характеристики исходного и химически обработанного Александрийского бурого угля

№ п\п	Уголь	Способ обработки	N, спин/г·10^{17}	ΔN, спин/г·10^{-17}	g-фактор	Δg-фактор	Δ H, Э
1	АБУ	Исходный	2,0	-	2,0038	-	-
2	АБУ	NaOH, ОУ	1,2	-0,8	2,0048	+0,0010	+0,8
3	АБУ	HCl, ОУ	1,62	-0,38	2,0037	-0,0001	-0,1
4	АБУ*	Исходный	2,35	-	2,0038	-	-
5	АБУ*	NaOH, ОУ	2,11	- 0,24	2,0042	+0,0004	+7,5
6	АБУ*	HCl, ОУ	1,90	- 0,45	2,0037	-0,0001	-0,3
7	АБУ*	ГК	2,82	+ 0,47	2,0036	-0,0002	-0,4

* По данным [31].

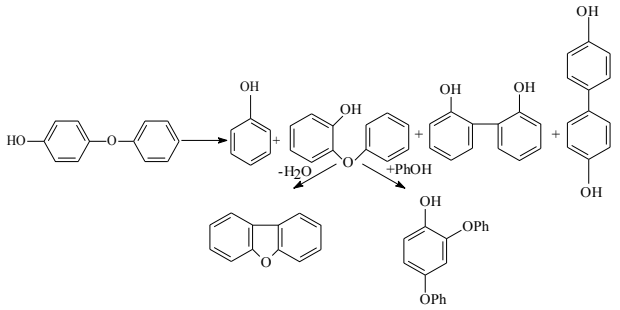
Табл. 4. Изменение парамагнитных характеристик исходного и химически обработанного Александрийского бурого угля при полукоксовании

Способ химической обработки	Т, °С	Концентрация р-ра щелочи, %	N, спин/г·10^{-17}	g-фактор	H, Э
-	-	-	2,0	2,0038	6,3
-	550 °С	-	5,92	2,0030	5,6
NaOH	-	-	1,20	2,0048	7,1
NaOH	550 °С	1	1,81	2,0029	5,3
NaOH	550 °С	5	3,36	2,0029	5,0
NaOH	550 °С	10	2,63	2,0029	3,9

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Аналогичные закономерности получены ранее по выходу жидких и газообразных продуктов химической обработки бурого угля. Максимальная степень превращения ОМУ в жидкие и газообразные вещества также наблюдалась при концентрации NaOH, равной 5 % [14]. Следовательно, добавка щелочи способствует образованию ПМЦ, способных стабилизировать парогазовые продукты, обогащая их водородом.

Предварительная обработка угля водой или водным раствором щелочи перед термообработкой способствует протеканию реакций гидролиза. Для описания механизма таких реакций при переработке углей полезно сопоставить полученные результаты с данными по изучению реакций акватермолиза модельных углерод- и гетероциклических соединений [32, 33]. Согласно этим данным, степень конверсии 4-феноксифенола при нагревании до 343 ^{0}C в циклогексане очень мала (1,6 %). При тех же условиях в воде образуются 77,8 % фенола и другие продукты согласно реакции:



Можно предположить, что разрушение как межмолекулярных, так и внутримолекулярных ассоциатов приводит к снижению концентрации ПМЦ в полукоксе, обработанном 1 %-ной щелочью. По мере увеличения концентрации NaOH до 5 % возрастает доля ПМЦ, образовавшихся в результате катионообмена и последующего термического разложения органоминеральных соединений, в то время как в полукоксе из необработанного угля преимущественное образование ПМЦ происходит в результате разложения кислых КФГ. Данные, полученные при концентрации щелочи выше 5 %, показывают, что группы >COOMe менее устойчивы к нагреванию по сравнению с группами >COOH.

Для полукоксов, полученных в присутствии различных количеств NaOH, наблюдаются существенные изменения ширины линии спектра ЭПР: она уменьшается от 5,3 до 3,9 Э с увеличением концентрации щелочи от 1 до 10 % и остается без изменения при дальнейшем увеличении концентрации. Сужение линии при практически неизменном значении g-фактора (2,0029) может свидетельствовать об уменьшении доли дипольных взаимодействий в результате удаления кислород- и серосодержащих групп при нагревании углей и образовании более упорядоченной структуры, способствующей обменным взаимодействиям неспаренных электронов.

Выводы

Таким образом, обработка углей водными растворами щелочей позволяет достичь более высокой степени термической деструкции угля в результате осуществления реакций по ион-радикальному механизму. Образование стабильных ион-радикалов связано с восстановлением хинонов в щелочных средах, увеличением степени ароматичности ОМУ, удлинением системы полисопряжения с участием хинонов и образованием на их основе семихинонных анион-радикалов. При этом важную роль играют заместители, экранирующие реакционноспособные центры, количество которых уменьшается при термическом воздействии.

Щелочная обработка позволит осуществить комплексную переработку бурых углей с получением гуминовых кислот (ГК), дополнительного количества парогазовых, в том числе жидких, продуктов пиролиза и остаточного угля, который является реакционноспособным материалом для последующей переработки или использования в качестве энергетического сырья.

Список литературы

1. Stenberg, V.I. Radicals in coals during pyrolysis in relation to liquefaction conversion / V.I. Stenberg, M.B. Jones, N.J. Suwarnasarn // Fuel. – 1985. – No.4. Vol.64. – P. 470-474.
2. Petrakis, L. Formation and behavior of coal free radicals in pyrolysis and liquefaction conditions / L. Petrakis, D.W. Grandy // Nature. – 1981. – Vol. 289. – P. 476-477.
3. Aizenshtat, Z. Electron spin resonance of stable free radicals in sedimentary organic matter / Z. Aizenshtat, I. Pinsky, B.Spiro // Organic Geochemistry. – 1986. – No.6. Vol.9. – P. 321-329.
4. Experimental substantiation of the choice of caking additives according to the data of the study fluid non-volatile products of thermal filtration / L.F. Butuzova [et al.] // The 3rd International Conference on New Energy and Future Energy System (NEFES 2018), August 21 to 24, 2018, Shanghai, China. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Vol.188. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/188/1/012052
5. Структурные превращения молодых углей

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

при полукоксовании и их взаимосвязь с образованием ПМЦ / Л.Ф. Бутузова [и др.] // Вестник Донецкого национального технического университета. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – №4(14). – С. 88-95.
6. Парамагнитные свойства бурого угля Кияктинского месторождения до и после его механообработки и облучения электронами / Ю.А. Рябин [и др.] // Химия твердого топлива. – 2011. – №2. – С. 53-59.
7. Гагарин, С.Г. Кинетика накопления парамагнитных центров при термическом воздействии на угли // Химия твердого топлива. – 1987. – №2. – С. 12-23.
8. Application of electron paramagnetic resonance spectroscopy to examination of carbonized coal blends / B. Piawa [et al.] // International Journal of Coal Geology. – 2009. – No.77. – P. 372-376.
9. Любченко, Л.С. Возможные физические представления о парамагнетизме серосодержащих низкометаморфизованных каменных углей Донбасса / Л.С. Любченко, Г.П. Темерова, А.Ф. Луковников // Химия твердого топлива. – 1987. – №5. – С. 16-22.
10. Давыдова, Ж.А. Образование ПМЦ при термической и термоокислительной деструкции бурого угля и их реакционная способность: автореф. дис. … канд. хим. наук: 02.00.03 / Давыдова Жанетта Алексеевна. – Москва, 1980. – 26 с.
11. Шкляев, А.А. Ароксильные радикалы бурого угля / А.А. Шкляев // Химия твердого топлива. – 1987. – №2. – С. 3-8.
12. Pilawa, B. EPR studies of bituminous coal. Ethylenediamine system / B. Pilawa, A.B. Wieckowski, S. Duber // Erdoel Kohle, Erdgas, Petrochem. – 1990. – No.6. Vol. 43. – P. 240.
13. Retcofsky, H.L. Magnetic resonance studies of coal // Coal Science. – 1982. – Vol.1. – P. 43-82.
14. Бутузова, Л.Ф. Влияние щелочной обработки на парамагнетизм бурых углей при термодеструкции / Л.Ф. Бутузова, В.И. Саранчук, В.А. Тамко // Химия твердого топлива. – 1985. – №4. – С. 41-46.
15. Тамко, В.А. Физико-химические закономерности процесса термической деструкции малометаморфизованных углей в присутствии неорганических добавок: автореф. дис. … канд. хим. наук: 02.00.04 / Тамко Василий Александрович. – Донецк, 1986. – 16 с.
16. Окисленные в пластах бурые и каменные угли / Т.А. Кухаренко. – М.: Недра, 1972. – 215 с.
17. Derbyshhire, F.J. The production of activated carbons from coals by chemical activation / F.J. Derbyshhire, M. Jagtoyen, B.Mc. Enaney // Fuel Chemistry. – 1991. – No.3. Vol.36. – P. 1072-1080.
18. Кухаренко, Т.А. Структура гуминовых кислот, их биологическая активность и последействие гуминовых удобрений // Химия твердого топлива. – 1976. – №2. – С. 24-31.
19. Bimer, J. Effect of chemical pretreatment on coal solubilization by methanol-NaOH / J. Bimer, P.D. Salbut, S. Berlozecki // Fuel. – 1993. – No.7. Vol.72. – P. 1063-1068.
20. Mukherjee, S. Chemical demineralization/desulphurization of high sulphur coal using sodium hydroxide and acid solutions / S. Mukherjee, P.C. Borthakur // Fuel. – 2001. – No.14. Vol. 80. – P. 2037-2040.
21. Butuzova, L. The paramagnetic characteristics of pyrolysis products for coals treated by alkali and acid / L Butuzova, A. Krzton, I. Kozlova // Proceedings 9th International Conference on Coal Science, 7 Sep. 1997, Essen (Germany). – 1997. – Vol.1. – P. 91-94.
22. The effect of water on the yield and structure of the products of brown coal pyrolysis and hydrogenation / L. Butuzova [et al.] // Fuel. – 1998. – No.6. Vol.77. – P. 639-645.
23. Organic Chemistry. 3. Aquathermolysis: Reactivity of Ethers and Esters / M. Siskin [et al.] // Energy and Fuels. – 1990. – No.4. – P. 488-492.
24. Эндрюс, Л. Молекулярные комплексы в органической химии. / Л. Эндрюс, Р.Кифер. – М: Мир, 1967. – 206 с.
25. Саранчук, В.И. Термохимическая деструкция бурых углей / В.И. Саранчук, Л.Ф. Бутузова, В.Н. Минкова. – Киев: Наук. думка, 1993. – 224 с.
26. Influence of oxygen on the behaviour of oxygen-containing groups of soft coal in pyrolysis / L. Butuzova [et al.] // Fuel. – 1994. – No.6. Vol.73. – P. 945-950.
27. Васильева, Л.М. Исследование каменных углей Сибири / Л.М Васильева, К.И. Бочкарева. – Новосибирск: Наука, 1974. – 115 с.
28. Шкляев, А.А. Влияние некоторых факторов на парамагнитные центры бурого угля // Химия твердого топлива. – 1985. – №5. – С. 22-27.
29. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки: Учебник для вузов / В.М. Потехин, В.В. Потехин. – СПб: ХИМИЗДАТ, 2005. – 912 с.
30. Бучаченко, А.Л. Стабильные радикалы. Электронное строение, реакционная спо-

собность и применение /А.Л. Бучаченко, А.М. Вассерман. – М.: Химия, 1973. – 408 с.
31. Гирина, Л.В. Парамагнетизм механодеструктированного бурого угля и продуктов его щелочного гидролиза / Л.В. Гирина, В.П. Стригуцкий, Д.В. Лукьяненко // Химия твердого топлива. – 1995. – №3. – С. 38-42.
32. Бутузова, Л.Ф. Роль воды в процессах термической переработки бурого угля // Химия твердого топлива. – 1998. – №6. – С. 23-33.
33. Role of Moisture in Coal Structure and the Effects of Drying upon the Accessibility of Structure / E.M. Suuberg [et al.] // Energy and Fuels. – 1993. – No.3. Vol.7. – P. 384-392.

L.F. Butuzova /Dr. Sci. (Chem.)/
Donetsk National Technical University, Litvinenko Institute of Physic-Organic Chemistry and Coal Chemistry (Donetsk)
V.N. Shevkoplyas /Cand. Sci. (Chem.)/
Litvinenko Institute of Physic-Organic Chemistry and Coal Chemistry (Donetsk)
V.A. Kolbasa, G.N. Butuzov /Cand. Sci. (Chem.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE BROWN COAL RADICALS FORMED DURING CHEMICAL AND THERMO-CHEMICAL TREATMENT

Background. *An important direction in the study of the paramagnetism of young coals is the analysis of the influence of their paramagnetic centres' (PMC) sensitivity to chemical treatment with various reagents. Particularly informative are the data on the study of alkaline treatment allowing to identify sodium humates soluble in alkali, which are enriched with oxygen-containing functional groups, and to assess the contribution of this component to the processing of fuels.*
Materials and/or methods. *The samples of Kansk-Achinsk brown coal and Dnieper brown coal of Alexandria Deposit used as the object of research.*
Results. *EPR and DRIFT spectroscopy used to conduct a detailed study of the effect of temperature, time, alkali concentration on the processes of radical formation and functional composition of brown coals before and after their chemical treatment. The removal of humic acids contributes to a denser packaging of structural elements in the organic mass of fuels. The result of the alkaline treatment is an increase in the strength of intermolecular interactions, the increase in the proportion of carbonyl groups and the aromatic hydrogen in the residual coal, which leads to an increase in the size of the system polyconjuation and, as a consequence, the change in the concentration of paramagnetic centres, the time of the spin-spin relaxation, and the width of the EPR signal.*
Conclusion. *Alkaline treatment will allow carrying out complex processing of brown coals to obtain humic acids and an additional amount of the vapour-gas, including liquid, pyrolysis products and residual coal.*

Keywords: *coal, paramagnetic centres, functional groups, semi-quinone, semi-coaking.*

Сведения об авторах

Л.Ф. Бутузова
SPIN-код: 7391-2663
Author ID: 7004736806
ORCID iD: 0000-0002-4232-3057
Телефон: +380 (50) 921-38-51
Эл. почта: ludmila.lfb@yandex.ru

В.А. Колбаса
SPIN-код: 4466-7867
Телефон: +380 (95) 059-55-32
Эл. почта: vikula.ka@mail.ru

В.Н. Шевкопляс
Author ID: 6603169954
Телефон: +380 (95) 633-03-15
Эл. почта: v-shevkoplyas@ukr.net

Г.Н. Бутузов
SPIN-код: 4448-4394
Author ID: 8701390000
Телефон: +380 (50) 589-74-89
Эл. почта: ludmila.lfb@yandex.ru

Статья поступила 09.04.2019 г.
© Л.Ф. Бутузова, В.Н. Шевкопляс, В.А. Колбаса, Г.Н. Бутузов, 2019
Рецензент к.т.н., доц. И.Г. Дедовец

УДК 669.712

В.В. Шаповалов /д.х.н./, **С.В. Горбатко /к.т.н./**
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ПОЛУЧЕНИЕ АЛЮМОКАЛЬЦИЕВОГО СПЕКА ИЗ ОТХОДОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЛИНОЗЕМА МЕТОДОМ БЕСЩЕЛОЧНОГО СПЕКАНИЯ

Приведены экспериментальные данные по получению алюмокальциевого спека из отходов угледобывающих производств. Установлено, что на качество спека и степень извлечения из него глинозема существенное влияние оказывает оксид железа. Добавление в исходную шихту каолина позволяет снизить содержание оксида железа (III) до оптимального уровня, обеспечивая, тем самым, понижение температуры при получении высококачественного спека и высокую степень извлечения из спека глинозема. Определены оптимальный состав шихты и температурный режим получения алюмокальциевых спеков. Исходя из данных рентгенофазового анализа, шламы, образующиеся после извлечения глинозема, могут являться ценным компонентом в производстве цемента.

***Ключевые слова**: аргиллит, каолин, мел, алюмокальциевый спек, алюминат кальция, двухкальциевый силикат, алюминат натрия, белитовый шлам, глинозем.*

Постановка проблемы

В результате деятельности горнодобывающих и металлургических производств, предприятий ТЭК накапливается огромное количество отходов, которые в настоящее время занимают значительные территории и создают множество экологических проблем: продукты горения и твердые взвеси (пыль) попадают в атмосферу; растворимые соли и кислотные остатки – в грунтовые воды и грунты. Но при разработке соответствующих технологий они могут также являться источниками ценного минерального сырья. Так, например, каждые 1 млн. т породы угледобывающих шахт содержат примерно 160…200 тыс. т глинозема, что в пересчете на металл составляет около 84…105 тыс. т алюминия, не говоря уже о наличии в отходах соединений таких металлов, как ванадий, германий и т.д. По мере исчерпания природных ресурсов внимание к переработке отходов будет возрастать, что потребует значительных усилий по разработке соответствующих технологий. Проблема усложняется тем, что технология переработки существенно зависит от минерального и химического состава сырья, которое при использовании отходов изменяется в широких пределах.

Анализ последних исследований и публикаций

Объем использования отходов добычи и обогащения угля путем производства аглопорита, керамического кирпича, применения в дорожном строительстве, рекультивации земель не превышает 15 %. При выборе способа утилизации горных пород следует учитывать принципы рационального природопользования, принимая во внимание, что отходы добычи и обогащения горных пород содержат ряд ценных компонентов. Так, бокситы в своем составе могут содержать: Al_2O_3 – до 70 %; SiO_2 – 2…14 %; Fe_2O_3 – до 30 %; Ga – 0,005 %; Ge –до 0,1 %. Нефелин: Al_2O_3 –33 %; SiO_2 – 43…45 %; R_2O – 18…23 %; Ga – 0,004 %. Зола ТЭС – Al_2O_3 – до 25 %; SiO_2 – ~60 %; Fe_2O_3 – 8…14 %; R_2O – ~3 %. Аргиллит: Al_2O_3 – 21,9 %; SiO_2 – 59,6 %; Fe_2O_3 – 7,9 %; R_2O – ~3,9 %; Ga – 0,0043 %; Ge – 0,0006 %; V – 0,015 %.

Сложность переработки отходов горнодобывающих производств заключается в значительном содержании в их составе диоксида кремния SiO_2. В зависимости от его содержания используют различные методы переработки. Так, извлечение глинозема ($A1_2O_3$) из высококачественных бокситов осуществляется по способу Байера растворами щелочей с последующим выделением алюминия в виде гидроксида $A1(OH)_3$ [1]. Для низкосортного сырья с большим содержанием SiO_2 разрабатываются альтернативные способы извлечения глинозема: кислотные [2], термические [3…7], комбинированные [8]. Суть кислотных методов сводится к обработке сырья кислотами, в которых растворяются соединения металлов, но не растворяется диоксид кремния. Недостаток технологии заключается в накоплении кислотных шламов, коррозионной стойкости аппаратуры и разделении соединений железа и алюминия. В термических и комбинированных методах сырье при высоких температурах спе-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

кают с компонентами, которые связывают диоксид кремния в нерастворимые соединения, а затем из образующегося спека извлекают ценные компоненты кислотными или щелочными растворами. Проблемой термических методов являются высокие температуры спекания и переход ценных компонентов в формы, из которых они не извлекаются.

Одним из перспективных направлений комплексной утилизации техногенных отходов, содержащих глинозем, является способ бесщелочного спекания с известняком, который представляет интерес в реализации попутного производства глинозема, цемента и редкоземельных металлов. По способу бесщелочного спекания с известняком получают алюмокальциевый спек, который при выщелачивании содовыми растворами разлагается на алюминат натрия (жидкая фаза), являющийся источником глинозема, и двухкальциевый силикат (твердый остаток – белитовый шлам). В [9…13] рассмотрены основные факторы, влияющие на степень извлечения глинозема из алюмокальциевого спека: примеси, состав шихты, химизм процесса, температурные условия. Установлено, что для каждого вида сырья необходимо разрабатывать свои условия спекания. В [14] было рассмотрено извлечение глинозема из аргиллита, основного компонента породных отвалов и каолина, являющегося компонентом вскрышных пород месторождения огнеупорных глин. Установлено, что для систем аргиллит – мел и каолин – мел характерна высокая температура образования спека (1360…1400 °С) и невысокая степень извлечения из него глинозема. В [15] отмечается, что спек после извлечения глинозема, может быть использован в качестве компонента при производстве портландцемента либо в качестве добавки от 10 до 20 % в готовый цемент без потери его прочностных свойств. Таким образом, метод бесщелочного спекания позволяет разработать технологию полной утилизации отходов горнопромышленного комплекса.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является разработка технологии комплексной утилизации техногенных отходов, содержащих глинозем, включающей способ бесщелочного спекания отходов с известняком. Задача исследования – подобрать оптимальный состав шихты (аргиллит – каолин – мел), обеспечивающий пониженную температуру спекания и высокую степень извлечения глинозема.

Основной материал исследования

В качестве объекта исследования была выбрана трехкомпонентная система аргиллит – каолин – мел с различным стехиометрическим соотношением глиноземсодержащих минералов.

Для лабораторных исследований в качестве бесщелочного алюминийсодержащего сырья были выбраны каолин (вскрышные породы Просяновского месторождения каолина) и аргиллит (горные отвалы шахты «Речная»). Кальцийсодержащий компонент шихты – мел представлял некондиционные отходы содового производства фракцией менее 30 мм. Химический состав сырьевых компонентов приведен в табл. 1.

Для приготовления шихты для спекания каолин и аргиллит по отдельности измельчались в шаровой фарфоровой мельнице и с помощью сита 008 отбирались фракции с размером частиц менее 0,08 мм, а затем смешивались с измельченным мелом.

Шихта готовилась таким образом, чтобы обеспечить молярные соотношения основных компонентов для спекания, которые отвечают насыщенной шихте:

$$\frac{CaO}{SiO_2}=2; \qquad \frac{CaO}{Al_2O_3}=1{,}8; \qquad \frac{CaO}{Fe_2O_3}=1.$$

Для выбранного сырья расчетными оптимальными массовыми соотношениями $CaCO_3$ – сырье являются:

$$\frac{CaCO_3}{\text{Аргиллит}}=2{,}26; \qquad \frac{CaCO_3}{\text{Каолин}}=2{,}5.$$

Затворенную водой шихту с влажностью 40 % выкладывали в шамотный тигель, помещаемый в печь сопротивления. Использовали два типа печей с различными нагревателями: фехралью марки Х23Ю5 (рабочая температура 1300 °С,

Табл. 1. Химический состав сырьевых материалов

Сырьевой материал	Содержание оксидов, масс. %					
	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	Другие	п. п. п.*
Аргиллит	56,7	-	16,2	7,1	9,7	10,3
Каолин	56,3	-	32,6	0,1	1,7	9,3
Мел	0,8	54,3	0,4	0,3	1,4	42,8

* Потери при прокаливании.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

кратковременно до 1360 °С) и молибденом в инертной среде аргона (рабочая 1450 °С, но в зависимости от футеровки до 2200 °С). Для управления режимом спекания была разработана компьютерная система ПИД-управления печью. Программное обеспечение было выполнено на основе MasterSCADA, что позволило с высокой точностью задавать такие важные для технологии спекания параметры, как скорость нагрева печи, выдержку при заданной температуре и темп охлаждения. Контроль и выдерживание данных параметров крайне важны, так как только при определенном температурном режиме образующаяся высокотемпературная β-модификации $2CaO{\cdot}SiO_2$ (плотность 3,28 г/см^3) переходит в γ-модификацию (2,95 г/см^3). Этот переход приводит к саморассыпанию спеков в тончайший порошок. При нарушении температурного режима спек остается в камнеобразном состоянии, из которого глинозем практически не извлекается.

Охлажденный алюмокальциевый спек, содержащий алюминаты кальция $CaO{\cdot}Al_2O_3$ и $12CaO{\cdot}7Al_2O_3$, подвергали выщелачиванию содовым раствором (81,6…120 г/л Na_2CO_3) при 70 °С в течение 30 минут, в ходе которого проходят реакции и алюминий в виде алюмината натрия $NaAl(OH)_4$ переходит в раствор в соответствии со схемой:

$$m CaO{\cdot}Al_2O_3 + m Na_2CO_3 + (3+m)H_2O = 2NaAl(OH)_4 + m CaCO_3 + 2(m-1)NaOH;$$

$$CaO{\cdot}Al_2O_3 + Na_2CO_3 + H_2O = NaAl(OH)_4 + CaCO_3 + NaOH;$$

$$12CaO{\cdot}7Al_2O_3 + 12Na_2CO_3 + 33H_2O = 14NaAl(OH)_4 + 12CaCO_3 + 10NaOH.$$

Выщелачивание осуществляли в термостатируемом реакторе с перемешиванием раствора электрической мешалкой. Разделение пульпы проводили с помощью воронки Бюхнера и колбы Бунзена, подключенных к вакуумному насосу. Белитовый шлам промывали до нейтральной реакции, сушили и направляли для переработки в цемент.

Так как стадия выщелачивания является целевой в выделении глинозема в раствор, степень извлечения глинозема определяли по концентрации алюмината натрия $NaAl(OH)_4$, который анализировали согласно ГОСТ 22552.3-77. Анализ осуществляли при помощи комплексонометрического метода, сущность которого состоит в образовании трилонатного комплекса алюминия при pH=5,2..5,8 и титровании избытка трилона Б раствором сернокислого цинка.

Степень извлечения глинозема Al_2O_3 (%) из спека в алюминатный раствор рассчитывали по формуле:

$$A = \frac{X \cdot V(Na_2CO_3)}{A_{теор}},$$

где X – содержание глинозема в алюминатном растворе, г/мл; V (Na_2CO_3) – объем раствора соды, мл; $A_{теор}$ – теоретическое содержание глинозема в алюминатном растворе, г.

Комбинирование шихт аргиллит – мел и каолин – мел позволяет, с одной стороны, затруднить плавление шихты в печи и снизить температуру спекания, а с другой – увеличить выход глинозема по сравнению с двухкомпонентной шихтой.

Для определения количественного и качественного анализа, установления фазового состава продуктов спекания и выщелачивания был применен рентгенофазовый анализ. Съемка проводилась на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2. Количественный и качественный состав проанализированных образцов приведен в табл. 2. На рис. 1 представлена дифрактограмма алюмокальциевого спека, продукта спекания шихты аргиллит – каолин – мел, а на рис. 2 – дифрактограмма белитового шлама после выщелачивания алюмокальциевого спека.

Данные рентгенофазового анализа (рис. 1) показывают, что основными хорошо выраженными кристаллическими фазами в спеке после саморассыпания являются: $Ca_3Al_6SiO_{16}$ – 5 %; Ca_2SiO_4 – 60 %; неопределенная фаза – 35 %. Алюминийсодержащие фазы, из которых легко извлекается глинозем, находятся в рентгеноаморфном состоянии и на рентгенограмме не проявляются. Анализ показывает, что основными кристаллическими фазами шлама (рис. 2) являются белит (γ-Ca_2SiO_4) и муллит. В шламе содержится также 15…20 % $CaCO_3$, который образуется в результате разложения алюминатов кальция содой, оксид железа и некоторое количество неизвлеченного Al_2O_3.

Табл. 2. Количественный и качественный состав образцов по данным рентгенофазового анализа

Образцы для анализа	Количественный и качественный состав
1. Аргиллит – каолин – мел (спекание при 1300 °С)	$Ca_3Al_6SiO_{16}$ – 5 %; Ca_2SiO_4 – 60 %; неопределенная фаза – 35 %
2. Белитовый шлам	$3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$ (Mullite) – 5 %; Ca_2SiO_4 – 55 %; неопределенная фаза – 45 %

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

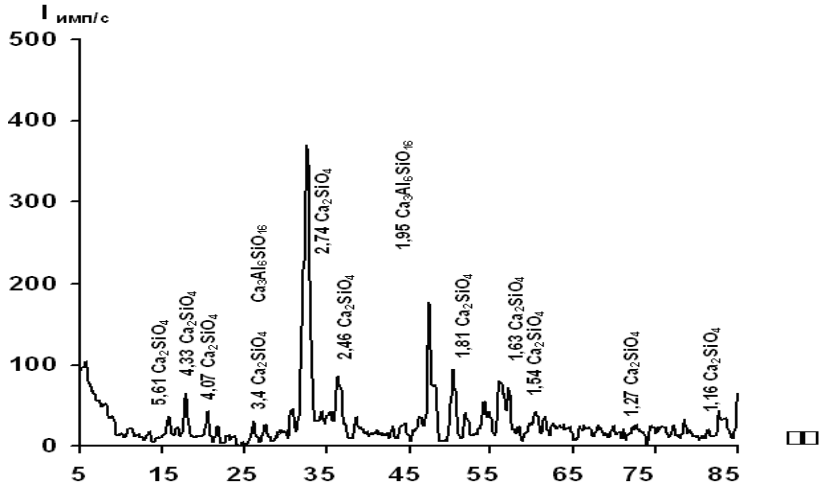


Рис. 1. Рентгенограмма продукта спекания аргиллит – каолин – мел. Температура спекания 1300 °С

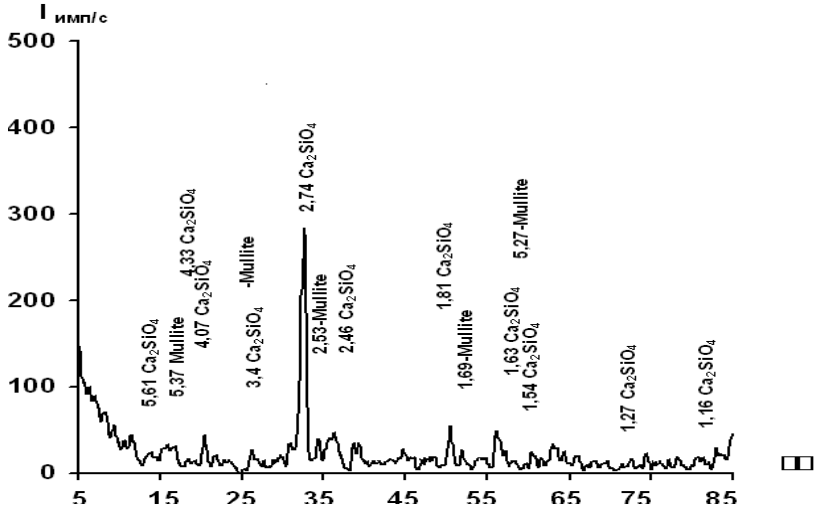


Рис. 2. Рентгенограмма белитового шлама

При добавлении к белитовому шламу аргиллита и мела можно подготовить шихту для получения цементного клинкера [13].

В табл. 3 приведены температурные режимы спекания композиций, составленных из шихт аргиллит – мел и каолин – мел. Как видно, в отличие от бинарных систем [15], высокая степень извлечения глинозема достигается при обжиге шихты уже при температуре 1280…1300 °С. Исходя из данных, приведенных в табл. 3, можно отметить, что важнейшим показателем для получения хорошего саморассыпающегося спека является выдержка шихты в печи при максимальной температуре на протяжении примерно 60 мин., а затем медленное охлаждение спека в печи на 40…50 °С на протяжении 20…40 мин., что характерно и для других видов сырья [5…7].

Степень извлечения глинозема существенно зависит от соотношения в шихте аргиллит – каолин (табл. 4). Оптимальным представляется соотношение аргиллит – каолин близкое к 3:7. Обращаем внимание, что данное соотношение связано с содержанием в шихте оксида железа.

Зависимость степени извлечения глинозема от содержания оксида железа (III) в смеси аргиллит – каолин представлена на рис. 2.

Как показали эксперименты, степень извлечения глинозема (рис. 3а) не линейно зависит от содержания в шихте каолина или аргиллита, а проходит через максимум. Это свидетельствует о том, что максимальное извлечение глинозема достигается при соблюдении вполне определенного химико-минералогического состава каолина и аргиллита, которое, с одной стороны, способствует извлечению оксида алюминия, а с другой – препятствует образованию стеклообразных фаз, уменьшающих степень извлечения глинозема. То есть в данном случае проявляется синергетический эффект, когда при обжиге минералы каолина блокируют образование стеклообразной фазы аргиллита и тем самым способствуют извлечению из него $A1_2O_3$, а минералы аргиллита понижают температуру перехода $A1_2O_3$ каолина в извлекаемую форму.

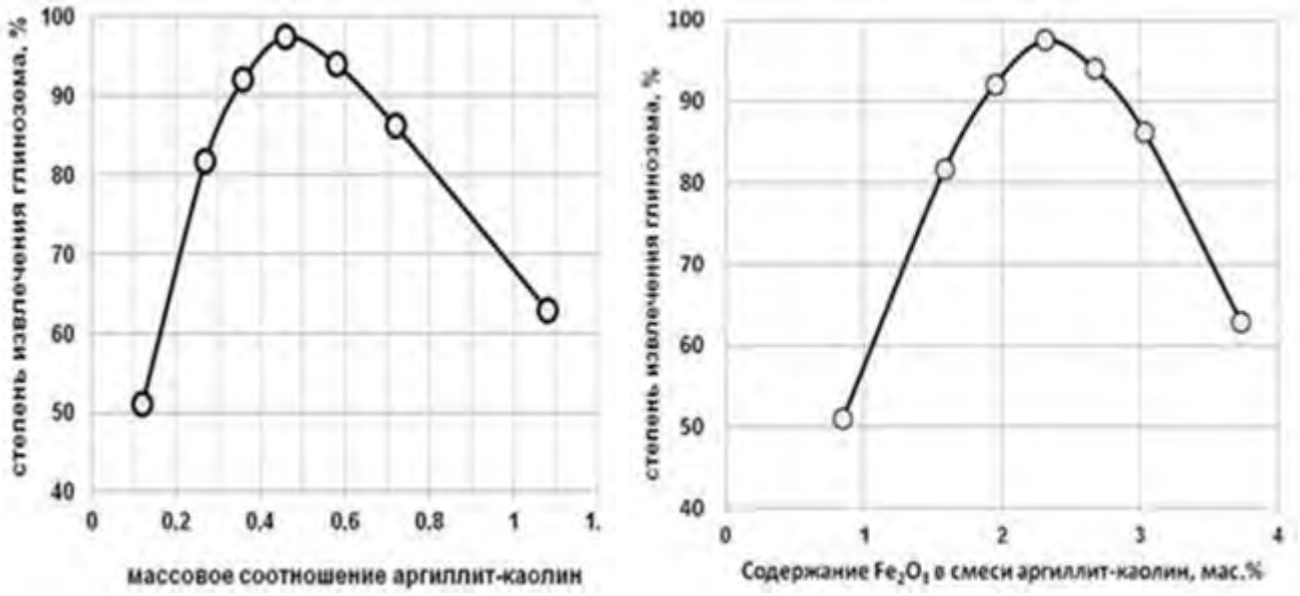
ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 3. Влияние температурного режима спекания на качество спека из шихты аргиллит – каолин – мел и степень извлечения глинозема

Массовое соотношение шихт (аргиллит-мел): (каолин-мел)	Спекание		Охлаждение		Извлечение глинозема, %	Саморассыпание спека
	t, °С	время, мин.	*t,* °С	время, мин.		
50:50	300	60	1240	30	62,9	пудра и кусочки
40:60	300	60	1240	40	86,4	хорошее
40:60	300	60	1200	40	78,8	хорошее
30:70	300	60	1250	20	95,1	отличное
30:70	300	60	1250	20	92,7	хорошее
30:70	300	60	1200	40	85	хорошее
30:70	280	60	1200	40	79,7	удовлетворительное
30:70	250	60	1200	40	52,0	пудра и кусочки, плохое
20:80	300	60	1200	40	81,0	хорошее
10:90	300	60	1250	20	51,0	пудра и кусочки, плохое

Табл. 4. Технологические параметры спекания шихты аргиллит-каолин-мел и степень извлечения глинозема

Состав сырья, масс. %		Содержание Fe_2O_3,масс. %	Состав шихты, масс. %			Расчетное содержание Al_2O_3, кг/т шихты	Температура спекания, °С	Степень извлечения глинозема, %
аргиллит	каолин		аргиллит	каолин	мел			
0,23	0,77	1,8	6,68	28,1	68,54	102,4	1260	90,3
0,31	0,69	2,3	9,06	22,4	70,74	87,7	1280	97,5
0,39	0,61	2,8	11,4	17,9	70,7	76,1	1290	91,2
1,0	-	7,1	29,2	-	70,8	47,3	1350	65,3
-	1,0	0,1	-	28,5	71,5	92,9	1360	84,8



а б

Рис. 3. Зависимость степени извлечения глинозема от соотношения в шихте аргиллит-каолин-мел: *а* – аргиллита и каолина; *б* – содержания оксида железа. Температура спекания 1300 °С. Охлаждение в печи до 1250 °С в течение 30 мин.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Зависимость степени извлечения глинозема от содержания оксида железа (III) в смеси аргиллит-каолин представлена рис. 3б. Как показывают экспериментальные данные, увеличение содержания Fe_2O_3 сначала приводит к увеличению степени взаимодействия между основными компонентами шихты и увеличивает степень извлечения глинозема. Однако с увеличением содержания Fe_2O_3, с одной стороны, образуются стеклообразные фазы, что приводит к ухудшению саморассыпания спека, а с другой – увеличивается вероятность образования тугоплавкого $2CaO \cdot Fe_2O_3$ ($t_{пл}$=1480 °С), вследствие чего оксид железа перестает выполнять функции плавня. Процессы спекания и саморассыпания спека ухудшаются, что приводит в итоге к уменьшению степени извлечения глинозема.

Из данных эксперимента (см. рис. 3б) следует, что для достижения степени извлечения глинозема более 90 % содержание Fe_2O_3 в смеси аргиллит-каолин должно быть равно 1,8…2,8 масс. %. При этом массовые доли аргиллита и каолина должны определяться соотношениями:

$$X = \frac{(1.8 \div 2.8) \quad (\%Fe_2O_3 \text{каолин})}{(\%Fe_2O_3 \text{аргилит}) \ (\%Fe_2O_3 \text{каолин})};$$

$$Y = 1 \quad \frac{(1.8 \div 2.8) \quad (\%Fe_2O_3 \text{каолин})}{(\%Fe_2O_3 \text{аргилит}) \quad (\%Fe_2O_3 \text{каолин})},$$

где X – массовая доля аргиллита, Y – массовая доля каолина.

Выводы

Предложена технология получения саморассыпающихся спеков при пониженной температуре спекания сырья, содержащего отходы угледобывающих производств и каолина. Установлено, что фактором, существенно влияющим на температуру спекания и степень извлечения глинозема из спеков, является оксид железа (III), содержание которого в исходной шихте для спекания должно находиться в пределах 1,8…2,8 %. При этом температура получения высококачественных спеков может не превышать 1300 °С, а степень извлечения глинозема из них составляет более 90 %. Продукт после извлечения глинозема представляет собой силикаты кальция, являющиеся компонентами цемента, что позволяет использовать его как в производстве цементного клинкера, так и в качестве добавки к готовому цементу.

Список литературы

1. Лайнер, А.И. Производство глинозема / А.И. Лайнер, Н.И. Еремин, Ю.А. Лайнер. – М.: Металлургия, 1978. – 420 с.
2. R. Den Hond. Alumina Yield in the Bayer Process; Past, Present and Prospects / R. Den Hond, I.Hiralal, A. Rijkeboer // Light Metals. – 2007. – No.7. – P. 528-533.
3. Шаршенбек, К.А. Исследование возможности получения глинозема из природной каолиновой глины Чоко-Булакского месторождения / К.А. Шаршенбек, З.Б. Кочкорова, Б.М. Мурзубраимов // Известия вузов Кыргызстана. – 2017. – № 7. – С. 74-77.
4. Holappa, L. Slags in ferroalloy production – review of present knowledge / L. Holappa, Y. Xiao // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. – 2004. – No.7. – P. 429-437.
5. Zhang, L. Recovery of titanium compounds from molten Ti-bearing blast furnace slag under the dynamic oxidation condition / L.N. Zhang, M.Y. Wang // Minerals Engineering. – 2007. – No.7. Vol.20. – P. 684-693.
6. Переработка нефелиновых сиенитов месторождения Турпи Таджикистана спекательным способом / М. Бодур [и др.] // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2016. – №1-3 (200). – С. 143-147.
7. Извлечение ценных компонентов из алюмосиликатных природных и техногенных материалов при получении глинозема способом спекания / И.И. Шепелев [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – №4(135), Т.22. – С. 203-214.
8. Инновационные направления полного использования золы ТЭС, работающих на угле, для производства глинозема и строительных материалов / Л.М. Делицын [и др.] // Теплоэнергетика. – 2013. – № 4. – С. 3-10.
9. Еремин, Н.И. Исследование химизма и механизма взаимодействий в системе CaO-$A1_2O_3$-SiO_2 при нагревании / Н.И. Еремин, В.Ф. Кочержинская, А.И. Егерева // Производство глинозема: труды ВАМИ. – 1969. – № 65-66. – С. 192-199.
10. Мазель, В.А. Разработка условий получения саморассыпающихся алюмокальциевых спеков, пригодных для переработки на глинозем / В.А. Мазель, Н.И. Еремин, В.П. Мельникова // Производство глинозема: труды ВАМИ. – 1969. – №65-66. – С. 153-159.
11. Панаско, Г.А. Влияние скорости охлаждения саморассыпающихся шлаков на их микроструктуру и технологические качества / Г.А. Панаско, Н.С. Гусева, Ю.И. Павлов // Произ-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

водство глинозема: труды ВАМИ. – 1969. – №65-66. – С. 206-210.
12. Абрамов, В.Я. Физико-химические основы комплексной переработки алюминиевого сырья / В.Я. Абрамов, И.В. Николаев, Г.Д. Стельмакова. – М.: Металлургия, 1985. – 288 с.
13. Мазель, В.А. Влияние Fe_2O_3, Na_2O, MgO, Cr_2O_3 и CaF_2 на некоторые свойства алюмокальциевых спеков / В.А. Мазель, Н.И. Еремин, В.П. Мельникова // Производство глинозема: труды ВАМИ. – 1969. – №65-66. – С. 200-205.
14. О возможности получения глинозема из отходов угле- и горнодобывающей промышленности методом спекания бесщелочного сырья с известняком / А.А. Клименко [и др.] // Научные труды ДонНТУ. Серия: Химия и химическая технология. – 2012. – №19(199). – С. 151-157.
15. Клименко, А.А. Использование белитового шлама глиноземного производства в качестве добавки при получении цемента / А.А. Клименко, Т.В. Шаповалова, Л.М. Реброва // Научные труды ДонНТУ. Серия: Химия и химическая технология. – 2014. – №2(23). – С. 189-194.

V.V. Shapovalov /Dr. Sci. (Chem.)/, **S.V. Gorbatko /Cand. Sci. (Eng.)/**
Donetsk National Technical University (Donetsk)

PRODUCTION OF ALUMOCALCIUM SINTER FROM MINING INDUSTRY WASTE FOR EXTRACTION OF ALUMINA BY THE METHOD OF ALKALI FREE SINTERING

Background. *The real ways to use the waste of coal production do not provide full processing. The complexity of the processing of these wastes lies in the significant content of silicon dioxide in their composition and depending on its content, various methods of processing used.*
A promising direction of complex utilization of technogenic waste containing alumina is a method of alkali free sintering with limestone; as a result, it is possible to obtain alumina, cement and rare earth metals. The task of the study was to choose the optimal composition of the charge material, which provides a low sintering temperature and a high degree of alumina extraction.
Materials and/or methods*. Three-component system of argillite – kaolin – chalk with a different stoichiometric ratio of alumina-containing minerals is the object of the study.*
The components of the charge were mixed in a particular proportion to obtain a given molar ratio and then crushed in a ball mill. After mixing with water, the charge burned. After cooling, the sinter leached with the extraction of aluminium oxide.
Results. *As a result, the charge compositions in the systems argillite – chalk and kaolin – chalk determined, in which the melting of the charge in the furnace is severe, the sintering temperature decreases, and the yield of alumina increases.*
Conclusion. *It is found that iron oxide (III) has a significant effect on the quality of the sinter and the degree of extraction of alumina from it. The addition of kaolin to the initial charge makes it possible to reduce the iron oxide content to the optimum level, thereby providing a decrease in temperature when producing high-quality sinter and a high degree of extraction of alumina from the sinter. The optimal composition of the charge and the temperature regime for obtaining aluminium-calcium sinters determined. Based on the data of x-ray phase analysis, sludge formed after the extraction of alumina can be a valuable component in the production of cement.*

Keywords: *argillite, kaolin, chalk, aluminium-calcium sinter, calcium aluminate, dicalcium silicate, sodium aluminate, belite sludge, alumina.*

Сведения об авторах

В.В. Шаповалов
SPIN-код: 2428-5889
Author ID: 56931339100
Researcher ID: A-8893-2016
ORCID iD: 0000-0001-8634-8929
Телефон: +380 (71) 385-51-05
Эл. почта: wwshapovalov@gmail.com

С.В. Горбатко
SPIN-код: 2241-5066
Author ID: 834373
Телефон: +380 (50) 189-02-75
Эл. почта: svgnick7@mail.ru

Статья поступила 15.05.2019 г.
© В.В. Шаповалов, С.В. Горбатко, 2019
Рецензент д.т.н., проф. Ю.Б. Высоцкий

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, НАПРАВЛЯЕМЫМ В РЕДАКЦИЮ

1. Основной текст статьи должен содержать такие необходимые элементы, выделенные заголовками, как:

– **постановка проблемы** в обобщенном виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;

– **анализ последних исследований и публикаций**, в которых начато решение данной проблемы и на которые опираются авторы, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья;

– формулировка **цели (задачи) исследования**;

– изложение **основного материала исследования** с полным обоснованием полученных научных результатов;

– **выводы** по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

2. Статья, основной текст вместе с рисунками и др. нетекстовыми элементами, должна быть объемом **8…10 полных** страниц формата А4 (210×297 мм) с полями **20** мм с каждой стороны. Рукопись статьи необходимо оформлять с помощью редактора MS Word. Шрифт – Times New Roman, **12** пт, стиль – обычный. Межстрочный интервал – одинарный. Расстановка переносов – автоматическая. Выравнивание – по ширине страницы. Страницы не нумеровать.

3. Структура статьи (каждый элемент с новой строки): код УДК; инициалы и фамилии авторов с указанием ученой степени каждого (количество авторов **не более 3-х** от одной организации); название организации, город, где работают авторы; название статьи; аннотация на русском языке (объемом **не более 300** символов); ключевые слова (**от 3 до 5**); основной текст статьи; список литературы. Сокращение слов в тексте, рисунках и таблицах не допускается.

В аннотации на русском языке сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

В конце статьи, после списка литературы приводятся инициалы и фамилии авторов, ученые степени, организации, города, название статьи, аннотация и ключевые слова на английском языке

Аннотация на английском языке должна представлять собой резюме, призванное выполнять функцию независимого от статьи источника информации. Резюме должно быть информативным (не содержать общих слов), оригинальным (не являться калькой аннотации на других языках), содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований), структурированным (следовать логике описания результатов в статье), компактным, но не коротким (объемом **от 250 до 300** слов). Типичная структура резюме: состояние вопроса (**Background**); материалы и/или методы исследования (**Materials and/or methods**); результаты (**Results**); заключение (**Conclusion**).

Внимание! Убедительная просьба не разбивать текст на колонки, как это сделано в журнале, т.к. это усложняет редакторскую обработку статьи!

4. **Обязательным условием** является наличие в статье графического материала (рисунков, графиков, схем, фотографий), размером **не менее 80×80** мм, в формате *.tif или *.jpg, разрешением **не менее 300** dpi. Графический материал внедренными объектами размещается по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Все позиции, обозначенные на рисунках, должны быть объяснены в тексте. Под каждым рисунком указывается его порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце). Рисунки должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

Внимание! Запрещается внедрять графические материалы в виде объектов, связанных с др. программами, например, с КОМПАС, MS Excel и т.п. Рисунки, выполненные непосредственно в MS Word не принимаются.

5. Математические формулы необходимо выполнять с помощью редактора формул **MS Equation Editor 3.0** в соответствии со следующими размерами: обычный символ – **11** пт; крупный индекс – **7** пт; мелкий индекс – **5** пт; крупный символ – **13** пт; мелкий символ – **8** пт.

Все величины, входящие в формулы, должны быть объяснены в тексте. Формулы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу. Формулы выполняются курсивом, **кроме цифр и символов греческого алфавита**. Формулы нумеруются (справа в круглых скобках, не отступая от формулы) **только в том случае**, если в тексте на них имеются ссылки.

Внимание! Количество формул в статье **не более 5**. Запрещается выполнять формулы с помощью MathCAD или др. аналогичных программ.

6. Таблицы должны иметь порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце) и располагаться по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Таблицы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

7. **Обязательным условием** является наличие в статье списка литературы, который приводится после выводов через один интервал (пустую строку) под заголовком **Список литературы**. Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу по тексту заключаются в квадратные скобки. В списке литературы должно быть **не менее 3-х** публикаций, вышедших **за последние 5** лет, а также **не менее 3-х** зарубежных (англоязычных) публикаций.

Для принятия решения о публикации статьи в журнале, в адрес редакции необходимо выслать:

– сопроводительное письмо (с указанием, что статья ранее нигде не публиковалась) от организации, где работают авторы, и сведения об авторах статьи;

– экспертное заключение о возможности опубликования материалов в прессе и других средствах массовой информации, заверенное печатью и подписью руководителя организации, где работают авторы;

– электронный вариант статьи (имя файла составляется из фамилий авторов, например, ИвановПетров.doc) и сведений об авторах (имя файла – ИвановПетров_sved.doc). *В сведениях об авторах для каждого соавтора обязательно должен быть указан телефон, адрес персональной эл. почты, а также коды регистрации в наукометрических базах данных.*

Для ускорения подготовки очередных номеров журнала, просьба передавать сопроводительное письмо в отсканированном виде, электронный вариант статьи и сведения об авторах по эл. почте на адрес: **vestnikdonntu@gmail.com**

Внимание! Убедительная просьба, проверить получение редакцией материалов любым из способов (по телефонам **+380 (66) 176-72-65, +380 (62) 301-07-89** или эл. почте).

Редакция оставляет за собой право возвращать статьи авторам на доработку в следующих случаях: статья небрежно оформлена и не соответствует требованиям редакции журнала, приведенным выше; статья требует доработки в соответствии с замечаниями рецензента и редакторов; отсутствует сопроводительное письмо от организации, где работают авторы или сведения об авторах.

Требования к рекламно-информационным материалам согласовываются непосредственно с редакцией журнала.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

НАУЧНЫЕ ИЗДАНИЯ Донецкого национального технического университета



Журнал «Вести Автомобильно-дорожного института = Bulletin of the Automobile and Highway Institute»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА № 000051 от 20 октября 2016 г.
Приказ МОН ДНР № 960 от 09.07.2019 г. о включении в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР
Лицензионный договор с РИНЦ № 427-07/2013 от 23.07.2013 г.

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
05.04 Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение;
05.22 Транспорт;
05.23 Строительство и архитектура;
08.00 Экономические науки.

Подробная информация - http://vestnik.adidonntu.ru



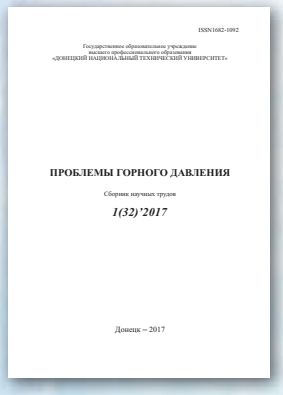
Научный журнал «Информатика и кибернетика»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000145 от 20.06.2017 г.
Приказ МОН ДНР № 34/16 от 28.01.2019 г. о включении в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР
Лицензионный договор с РИНЦ № 425-07/2016 от 14.07.2016 г.

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
05.13 Информатика, вычислительная техника и управление;
05.01 Инженерная геометрия и компьютерная графика.

Подробная информация - http://infcyb.donntu.org



Международный научный журнал «Проблемы горного давления»

Свидетельство о регистрации в СМИ ААА №000142 от 20.06.2017 г.
Лицензионный договор с РИНЦ № 425-07/2016 от 14.07.2016 г.

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
25.00 Науки о земле;
05.26 Безопасность деятельности человека.

Подробная информация - http://pgd.donntu.org



Студенческий научно-технический журнал «Инженер»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000134 от 06.06.2017 г.

Периодичность – 2 раза в год

Научно-исследовательская часть

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

science.donntu.org

ДонНТУ сегодня – это один из ведущих центров научной мысли Донбасса:

- *более 700 научно-педагогических работников;*
- *8 научных лабораторий, в т.ч. отдел интеллектуальной собственности и патентно-лицензионной работы;*
- *более 54 научных направлений и научных школ;*
- *ежегодно более 60 научно-исследовательских работ, в т.ч. 5 по договорам с промышленными предприятиями;*
- *4 диссертационных совета по 10 научным специальностям;*
- *14 направлений подготовки кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре;*
- *7 научных изданий, входящих в перечень ВАК ДНР и включенных в наукометрические базы данных (РИНЦ и др.);*
- *ежегодно более 2000 публикаций в научных изданиях республиканского и международного уровня;*
- *ежегодно более 117 научных и научно-технических мероприятий, в т.ч. более 19 мероприятий международного уровня;*
- *более 30 информационных ресурсов;*
- *базовая площадка Международного научного форума ДНР «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие»*



science.donntu.org/video
science.donntu.org/photo
science.donntu.org/rinc
science.donntu.org/book