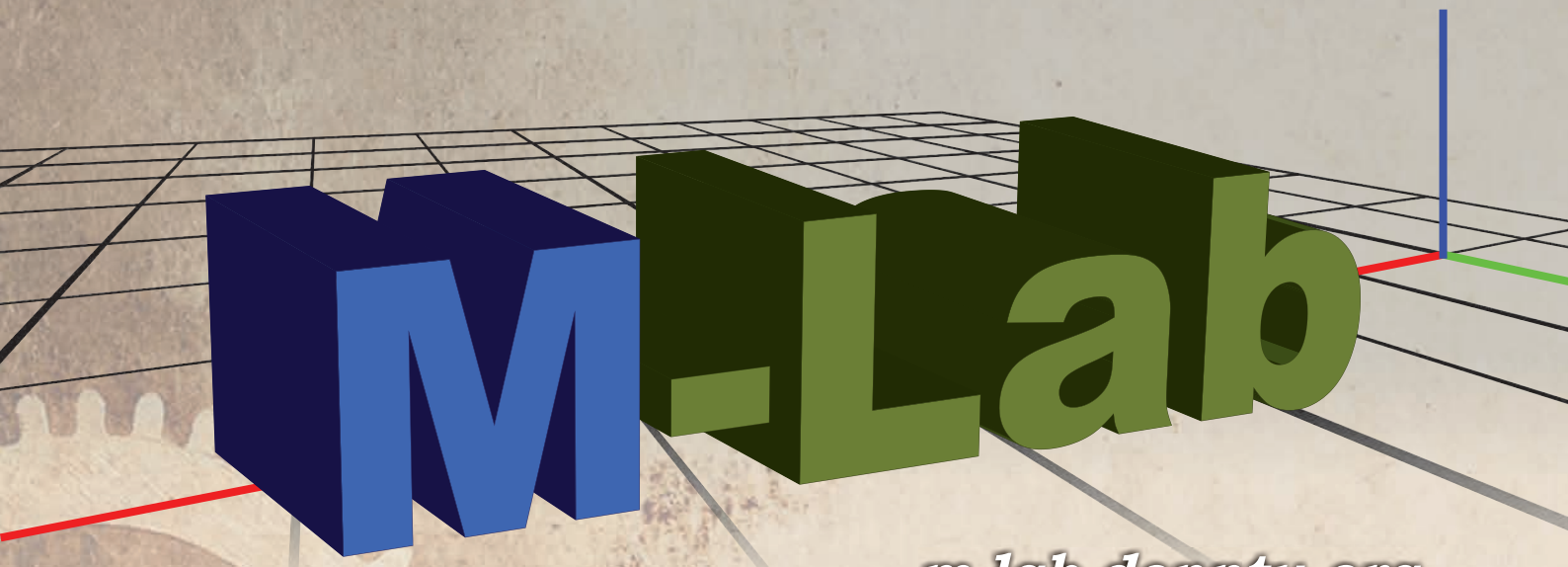
ISSN 2518-1653 (online)
vestnik.donntu.org

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЕСТНИК

№1 (15) 2019 г.



m-lab.donntu.org

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ



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 раза 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



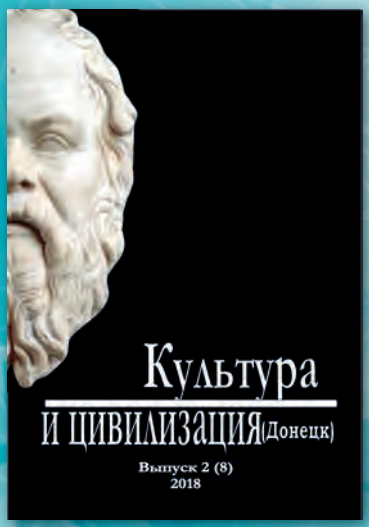
Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения»

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 раза 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 раза в год

Научные направления:
09.00 Философские науки;
23.00 Политология.

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

Вестник ДонНТУ №1(15)'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: 28300, г. Донецк, ул. Артема, 58
Телефон +380 (62) 301-07-89
Эл. почта: vestnikdonntu@gmail.com
Интернет: vestnik.donntu.org

Вестник ДонНТУ
2019. №1(15)

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 №2 от 22.03.2019

Формат 60×84 1/8. Заказ 0319.
Изд-во «Донецкая политехника», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

С.И. Аввакумов
Ассоциация механиков «АссоМ» – 17 лет инноваций 3

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Д.А. Власенко, Э.П. Левченко, Г.А. Билан
Математическое моделирование процесса изнашивания молотков при дроблении материала свободным ударом 8

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Н.Г. Афендиков
Портативная установка для определения прочностных свойств горных пород 17

А.Я. Грудачев, Т.П. Мищенко
Исследование процесса нагрева поддерживающего ролика в аварийном режиме эксплуатации ленточного конвейера 26

О.Ф. Ларионов
Анализ параметров разрушения горных пород шарошечными долотами буровых станков применительно к условиям Каракубского и Родниковского месторождений флюсовых известняков 32

С.А. Матвиенко, А.В. Лукичев, Ю.Н. Стрельник
Моделирование кинематики при работе сферических шарниров дорожных машин для повышения безопасности их эксплуатации 40

В.Н. Скляров
Исследование деформаций конвейерных роликов с разрезной осью 47

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

И.А. Бершадский, С.В. Шлепнев, А.Ю. Гладков
Совершенствование математической модели разряда емкостной искробезопасной цепи 51

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев, П.М. Матеко
Система механизированной подачи стартовой смеси в канал сталеразливочного ковша 59

А.В. Кузин, Н.С. Хлапонин
Оценка газопроницаемости рудной части шихты при введении в нее коксового орешка 66

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

С.Л. Хилько, М.И. Рогатко, Р.А. Макарова, Р.Г. Семенова, О.И. Невечеря
Антирадикальные и потенциометрические характеристики гуминовых веществ из разных природных источников 73

ИНФОРМАЦИЯ

Требования к статьям, направляемым в редакцию 80

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 №1(15)'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.1(15)

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.2 dated 22.03.2019

Format 60×84 1/8. Order 0319
Publishing house
"Donetsk Polytechnic", 2019

CONTENTS

SCIENTIFIC NOTES

S.I. Avvakumov
Association of mechanics "AssoM" – 17 years of innovation 3

ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

D.A. Vlasenko, E.P. Levchenko, G.A. Bilan
Mathematical modeling of the process of hammers wear at free impact crushing the material 8

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION ENGINEERING

N.G. Afendikov
Portable device for determining the strength properties of rocks 17

A.Ya. Grudachev, T.P. Mishchenko
Study of the support roller heating process in an emergency mode of belt conveyor operation 26

O.F. Larionov
Analysis of the parameters of breaking rock with roller bits of drilling rigs in conditions of Karakubian and Rodnikovskiy deposits of flux limestones 32

S.A. Matvienko, O.V. Lukichov, Yu.N. Strelnik
Modeling the kinematics of the road car spherical joints at work in order to improve their operation safety 40

V.N. Sklyarov
The deformations study of conveyor rollers with a split axle 47

ELECTRICAL ENGINEERING

I.A. Bershadsky, S.V. Shlepnev, A.Yu. Gladkov
Improving the mathematical discharge model of the capacitive intrinsically safe circuit 51

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

S.P. Eron'ko, M.Yu. Tkachev, P.M. Mateko
The system of mechanized feeding of the starting mixture into the ladle channel 59

A.V. Kuzin, N.S. Khlaponin
Evaluation of gas permeability of the ore burden with the introduction of nut coke 66

CHEMICAL TECHNOLOGY

S.L. Khil'ko, M.I. Rogatko, R.A. Makarova, R.G. Semyonova, O.I. Nevecherya
Antiradical and potentiometric characteristics of humic substances from different natural sources 73

INFORMATION

Requirements for the papers submitted to the Editorial office 80

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 334.7+62.7+62.1

С.И. Аввакумов /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

АССОЦИАЦИЯ МЕХАНИКОВ «АССОМ» – 17 ЛЕТ ИННОВАЦИЙ

В 2001 году выпускниками кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии им. проф. В.Я. Седуша» ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» была создана Ассоциация механиков «АссоМ». Более 17 лет Ассоциация механиков «АссоМ» находилась на острие науки и техники.

Ключевые слова: *инновации, диагностика, оборудование, производство, выставка.*

Ассоциация механиков «АссоМ» (далее – Ассоциация) объединила индивидуальных и коллективных членов в решении важных вопросов для любой отрасли промышленности: технического обслуживания, диагностирования, ремонта, восстановления и модернизации технологического оборудования. Среди членов Ассоциации были ученые, инженеры и специалисты промышленных предприятий и организаций. Основополагающими целями деятельности Ассоциации являлись:

– обмен информацией о новых методах проектирования, монтажа, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования;

– ускорение использования новых достижений науки и техники на предприятиях и в организациях Донецкого региона;

– повышение качества подготовки инженеров-механиков в соответствии с современными требованиями;

– повышение квалификации инженерно-технических работников предприятий и организаций Донецкого региона.

Трудно переоценить необходимость и своевременность создания Ассоциации на рубеже тысячелетий. Затягивавшийся переход к рыночной экономике в странах СНГ отрицательно сказался на производственных мощностях. Отсутствие грамотных собственников и менеджеров промышленных предприятий привело к тому, что основные фонды не обновлялись, а из эксплуатируемого технологического оборудования выжималось по максимуму без учета его технического состояния. В результате снижалось качество продукции, технологическое оборудование не обслуживалось и не ремонтировалось на должном уровне, увеличивалось количество аварий.

Современные технологии, методы и средства обслуживания и ремонта технологического оборудования были востребованы на всех промышленных предприятиях, и в этом созданная Ассоциация грамотно и активно помогала предприятиям. При непосредственном участии специалистов и экспертов Ассоциации были реструктуризированы ремонтные службы многих крупных промышленных предприятий Донецкого региона.

Успех Ассоциации закладывался в 80-х годах XX века. В 1984 г., учитывая научные достижения кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии им. проф. В.Я. Седуша» ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (ДонНТУ) и понимая новые возможности такого научного направления, как техническая диагностика, Министерством черной металлургии СССР была создана на базе кафедры Отраслевая научно-исследовательская лаборатория «Техническое обслуживание и диагностика металлургического оборудования» (далее – лаборатория). Лаборатория просуществовала до 1991 г., когда в результате известных событий Министерство черной металлургии СССР было ликвидировано, а соответственно, и прекращено финансирование всех работ лаборатории. За годы существования лаборатории было выполнено большое количество исследовательских работ на всех металлургических заводах и комбинатах Украины, России, Казахстана, Беларуси и Молдовы. Научным руководителем лаборатории профессором В.Я. Седушем была создана научная школа «Техническое обслуживание и диагностика металлургического оборудования», в которой прошло обучение большое количество специалистов в области технической диагностики.

В 1990-х годах с непосредственным участием ученых и специалистов лаборатории было создано несколько предприятий по оказанию услуг в области технической диагностики, по производству средств технической диагностики и гидравлических инструментов для механосборочных работ (рис. 1). Некоторые из предприятий перешагнули рубеж 25-летней деятельности. А кафедра тем временем продолжала выпускать

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

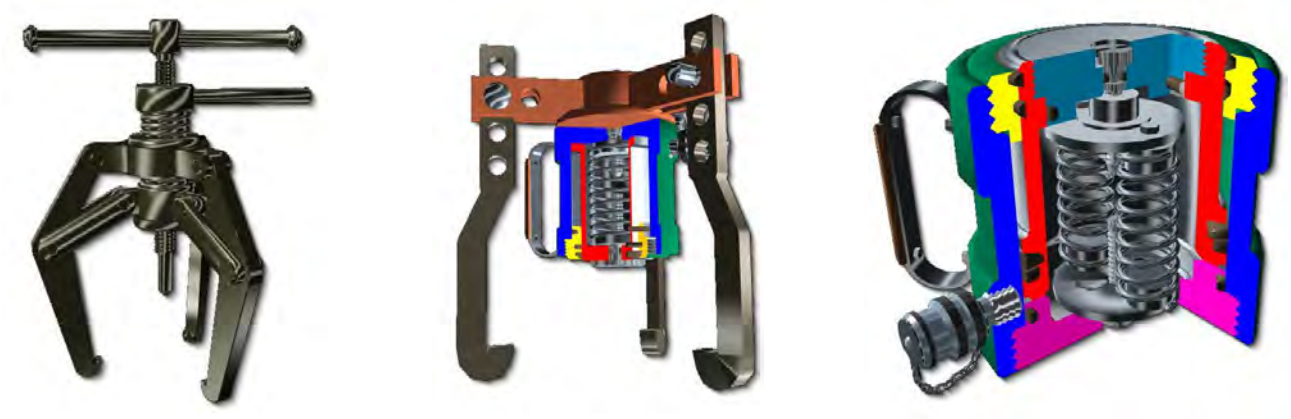


Рис. 1. Гидравлический инструмент для механосборочных работ образца 2005 г.

специалистов и готовить высококвалифицированные кадры (докторов и кандидатов технических наук) в области технической диагностики (вибродиагностики, экспертных систем, надежности машин и т.д.).

В годы активной деятельности Ассоциация по праву была правопреемником ранее созданной лаборатории. Совместно с ведущими профильными предприятиями Ассоциация проводила обучение специалистов промышленных предприятий по программам курсов: «Вибродиагностика и балансировка роторных машин»; «Техническое обслуживание и диагностика промышленного оборудования»; «Ремонт и восстановление промышленного оборудования»; «Монтаж оборудования и механосборочные работы». Программа подготовки специалистов включала передачу авторских методических материалов, проведение теоретических и практических занятий с использованием современных приборов и инструментов. Практические занятия проводились как в лабораторных, так и в производственных условиях с привлечением ведущих специалистов предприятий региона.

Ежегодно Ассоциация принимала активное участие в организации и информационной поддержке профильных мероприятий, а также отраслевых выставок, проводимых в Донецке, Кривом Роге, Киеве, Москве, Санкт-Петербурге и Екатеринбурге.

На выставках Ассоциация представляла экспозиции научной и учебной литературы, научно-технических разработок и образцов продукции членов, партнеров и друзей Ассоциации. Также Ассоциация самостоятельно проводила различные Международные научно-технические конференции и блиц-выставки, главные из них – «Вибрация машин: измерение, снижение, защита» и «Металлургические процессы и оборудование». Проводились научно-практические конференции и семинары, презентации предприятий и «круглые столы» по актуальным проблемам и вопросам совместно с ведущими предприятиями профильных направлений деятельности (рис. 2, 3). Всего было проведено более 30-ти мероприятий.



а б

Рис. 2. III Международная научно-техническая конференция
«Вибрация машин: измерение, снижение, защита», 23…25 мая 2005 г.:
а – профессор В.Я. Седуш и доктор наук,
представитель компании «Брюль и Къер» (Дания) Йорган Браш;
б – экспозиция вибродиагностических приборов ООО «Диамех 2000» (г. Москва)

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



а



б

Рис. 3. II научно-практический семинар
«Вибродиагностика промышленного оборудования», 12 декабря 2007 г.:
а – руководитель отдела продаж фирмы 01dB Metravib (Франция)
по Восточной Европе Патрис Де Непонд и профессор В.Я. Седуш;
б – директор ООО «Спектр Инжиниринг» (г. Москва) А.Р. Ширман

Участниками конференций, семинаров и «круглых столов» были специалисты, руководители ремонтных и эксплуатационных служб промышленных предприятий (технические директора, главные механики, начальники служб и цехов, инженеры); научно-производственные, научно-исследовательские и проектные организации, а также коммерческие предприятия и организации. Участие в мероприятиях приняли порядка 1000 представителей 400 предприятий и организаций Украины, России, Молдовы, Республики Беларусь, Германии, Франции, Дании и Польши.

В 2005 г. Ассоциация учредила ежеквартальные Международные научно-технические и производственные журналы «Вибрация машин: измерение, снижение, защита» и «Металлургические процессы и оборудование». Журналы распространялись по подписке, на профильных выставках, конференциях, семинарах по Украине, России и зарубежным странам.

В 2014 г. совместно с рядом предприятий г. Донецка было инициировано создание на базе ДонНТУ учебного и экзаменационного центра по таким методам контроля, как визуальный и измерительный, вибродиагностический, тепловой и магнитный. Однако, известные события 2014…2015 гг. помешали осуществлению задуманных планов.

Несмотря на сложившуюся ситуацию, ученые и специалисты Ассоциации и кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии им. проф. В.Я. Седуша» ДонНТУ внесли весомый вклад в развитие науки и техники, а именно: в разработку нестандартного оборудования для непрерывной разливки стали [1,2,3]; создание и внедрение методов и оборудования для контроля и регулирования положения оборудования машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) [4…7] и различных технологических машин [8]; развитие научных основ обеспечения геометрической [9,10,11] и кинематической точности МНЛЗ [12,13,14]; разработку методов диагностирования технологического оборудования МНЛЗ [15,16], в частности, механизмов качания кристаллизаторов [17,18,19]; совершенствование научных основ проектирования современных механизмов качания кристаллизаторов [20,21]; исследование вопросов эксплуатации [22] и обеспечения надежности подшипниковых узлов [23…26] и резьбовых соединений [27,28] металлургических машин; улучшение технологий и оборудования в колесопрокатном производстве [29…33]; повышение качества подготовки инженеров-механиков в соответствии с современными требованиями [34,35] и во многое другое.

Список литературы

1. Еронько, С.П. Совершенствование системы быстрой смены погружных стаканов для серийной разливки стали на слябовых МНЛЗ / С.П. Еронько, А.Л. Сотников, М.Ю. Ткачев // Металлургические процессы и оборудование. – 2012. – №3(29). – С. 26-38.
2. Автономная пневмомеханическая система дозированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ / С.П. Еронько [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2011. – №2(24). – С. 10-18.
3. Расчет и конструирование системы быстрой замены погружных стаканов при непрерывной разливке стали / С.П. Еронько [и др.] //

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

Металл и литье Украины. – 2011. – №12. – С. 36-44.
4. Шоломицкий, А.А. Контроль геометрических параметров машины непрерывного литья заготовок / А.А. Шоломицкий, А.Л. Сотников, В.И. Адаменко // Металлургические процессы и оборудование. – 2007. – №3(9). – С. 27-30.
5. Могильный, С.Г. Геодезические работы при проверке соосности оборудования машины непрерывного литья заготовок / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, А.Л. Сотников // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – №2(16). – С. 19-27.
6. Совершенствование технологий контроля положения и выставки оборудования МНЛЗ / С.Г. Могильный [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2012. – №3(29). – С. 12-25.
7. Разработка принципов выставки оборудования сортовой МНЛЗ / А.Л. Сотников [и др.] // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2018 – №1(11). – С. 3-11.
8. Технология контроля и выставки вращающихся агрегатов / А.А. Шоломицкий [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2013. – №2(32). – С. 39-49.
9. Сотников, А.Л. Контроль соосности оборудования МНЛЗ // Металлургические процессы и оборудование. – 2006. – №1(3). – С. 24-27.
10. Сидоров, В.А. Метод оперативного контроля соосности кристаллизатора с технологической осью ручья МНЛЗ / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников // Черная металлургия. – 2006. – №9. – С. 38-41.
11. Сидоров, В.А. Определение радиуса качания кристаллизатора МНЛЗ / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников // Современная электрометаллургия. – 2006. – №4. – С. 43-46.
12. Сидоров, В.А. Исследование влияния давления воздуха в пневмоамортизаторах механизма качания на параметры движения кристаллизатора МНЛЗ / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников, А.Л. Нестеров // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – №4(18). – С. 14-19.
13. Сотников, А.Л. Контроль соосности колебательного движения кристаллизатора с технологической осью ручья МНЛЗ / А.Л. Сотников, А.А. Шоломицкий // Металлург. – 2016. – №10. – С. 45-50.
14. Сотников, А.Л. Контроль параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2016. – №5. – С. 242-249.
15. Сотников, А.Л. Современные тенденции развития портативных анализаторов вибрации // Научно-технический прогресс в черной металлургии-2017: сб. докл. III Межд. науч. конф., 19-20 октября 2017 г., Череповец, 2017. – С. 218-224.
16. Сотников, А.Л. Задачи и методы контроля и диагностирования технологического оборудования МНЛЗ // Металлургические процессы и оборудование. – 2014. – №3(37). – С. 33-44.
17. Сотников, А.Л. Диагностирование электромеханического привода механизма качания кристаллизатора МНЛЗ // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – №5. – Т.59. – С. 334-338.
18. Нормирование режимов работы и уровня вибрации механизма качания кристаллизатора МНЛЗ // А.Л. Сотников [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2013. – №1 (31). – С. 44-54.
19. Сидоров, В.А. Определение технического состояния механизмов качания МНЛЗ / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – №8. – С. 202-205.
20. Сотников, А.Л. Математическая модель и методика синтеза упругих элементов рессорного механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / А.Л. Сотников, С.Н. Царенко // Вестник машиностроения. – 2017. – №12. – С. 25-29.
21. Сотников, А.Л. Теоретические основы проектирования рычажного механизма качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ / А.Л. Сотников, А.Б. Кикин // Металлург. – 2017. – №12. – С. 35-42.
22. Сидоров, В.А. Эксплуатация подшипников качения / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2014. – 175 с.
23. Родионов, Н.А. Влияние динамического нагружения на эффект проскальзывания между элементами подшипников механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / Н.А. Родионов, А.Л. Сотников, Е.В. Ошовская // Металлургические процессы и оборудование. – 2014. –№3(37). – С. 58-63.
24. Сотников, А.Л. Расчет долговечности подшипников качения механизма качания кристаллизатора МНЛЗ // А.Л. Сотников, Н.А. Родионов, А.С. Парфенюк // Металлургические процессы и оборудование. – 2014. – №1(35). – С. 71-78.
25. Сотников, А.Л. Анализ силового нагружения шарниров и опор механизма качания кри-

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

сталлизатора сортовой МНЛЗ / А.Л. Сотников, Н.А. Родионов, С.В. Птуха // Металлург. – 2014. – №10. – С. 51-56.
26. Scale levels of damage to the raceway of a spherical roller bearing / P.O. Maruschak [et al.] // Engineering Failure Analysis. – 2016. – Vol.59. – P. 69-78.
27. Сотников, А.Л. Сборка крупногабаритных резьбовых соединений методом приложения осевых сил / А.Л. Сотников, С.В. Щербина // Сб. науч. тр. Донбасского государственного технического университета. – 2017. – №5 (48). – С. 167-174.
28. Сотников, А.Л. Унификация требований к крупногабаритным резьбовым соединениям металлургического оборудования / А.Л. Сотников, С.В. Щербина // Научно-технический прогресс в черной металлургии-2017: сб. докл. III Межд. науч. конф., 19-20 октября 2017 г., Череповец, 2017. – С. 225-231.
29. Снитко, С.А. Влияние схем штамповки колесных заготовок на силовые режимы работы формовочного пресса и износ инструмента деформации / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, А.Л. Сотников // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – №5, Т.61. – С. 385-392.
30. Снитко, С.А. Силовые режимы работы формовочного пресса при штамповке колёсных заготовок / С.А. Снитко, А.Л. Сотников, А.В. Яковченко // Сб. науч. тр. Донбасского государственного технического университета. – 2018. – №10(53). – С. 57-63.
31. Снитко, С.А. Износ инструмента деформации при штамповке колесных заготовок / С.А. Снитко, А.Л. Сотников, А.В. Яковченко // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2018. – №2(12). – С. 9-14.
32. Снитко, С.А. Взаимосвязь режимов прокатки с нагрузками и запасом прочности наклонных валков колесопрокатных станов горизонтального и вертикального типов / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, А.Л. Сотников // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – №3(9). – С. 14-29.
33. Снитко, С.А. Совершенствование технологии и оборудования в колесопрокатном производстве / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, А.Л. Сотников // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – №4(10). – С. 13-21.
34. Сотников, А.Л. Особенности дистанционного обучения / А.Л. Сотников, И.Ф. Муханова // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2018. – №3(13). – С. 3-8.
35. Онищенко, В.П. Состояние и перспективы развития учебной дисциплины «Теория механизмов и машин» в Донецком национальном техническом университете / В.П. Онищенко, А.Л. Сотников // Теория механизмов и машин. – 2010. – №2(16), Т.8. – С. 80-84.

Сведения об авторе
С.И. Аввакумов
SPIN-код: 7906-3266
Author ID: 840460
Телефон: +380 (71) 419-33-75
Эл. почта: avvak09@yandex.ua

Статья поступила 10.01.2019 г.
© С.И. Аввакумов, 2019



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

УДК 621.926.9

Д.А. Власенко, Э.П. Левченко /к.т.н./, Г.А. Билан
ГОУ ВПО «Донбасский государственный технический университет» (Алчевск)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ МОЛОТКОВ ПРИ ДРОБЛЕНИИ МАТЕРИАЛА СВОБОДНЫМ УДАРОМ

На основании изучения кинематики молотка при свободном ударе и формулы Финни разработана математическая модель изнашивания бил в молотковой дробилке. На базе опытных данных получены регрессионные модели изнашивания ударных органов при измельчении известняка. В результате выявлено влияние массы молотков на их износ при ударном контакте.

***Ключевые слова**: молотковая дробилка, молоток, известняк, изнашивание, эрозионный износ.*

Постановка проблемы

В настоящее время общий металлофонд технологических машин и металлургического оборудования выражается в миллиардах тонн, при этом большинство их рабочих деталей и узлов подвергаются интенсивному абразивному износу.

В металлургической отрасли затраты на изготовление запасных частей составляют сотни миллионов рублей, а металла на их производство тратится гораздо больше, чем на производство новых машин, агрегатов и технологического оборудования. Складывается ситуация, когда в связи с относительно невысоким сроком службы затраты на замену сменного оборудования, техническое обслуживание (ТО) и различные ремонты за период эксплуатации в несколько раз превышают их первоначальную стоимость.

Современные тенденции развития, связанные с повышением надежности, эффективности эксплуатации и производительности оборудования предприятий черной металлургии на первый план выдвигают проблему повышения их долговечности и износостойкости в ряд важнейших задач народно-хозяйственного значения. Срок службы технологического оборудования остается недостаточным, при этом значительный износ деталей рабочих органов наблюдается в агрегатах, эксплуатируемых в ударно-абразивной и агрессивной средах.

Анализ последних исследований и публикаций

Одним из самых металлоемких видов оборудования являются дробильные машины и измельчители, в частности молотковые дробилки. Из опыта работы металлургических предприятий известно, что срок службы отдельных их рабочих органов в зависимости от свойств перерабатываемого материала не превышает 500 часов [1,2].

Решению проблем повышения эффективности работы, надежности и долговечности отдельных узлов и деталей дробильных машин посвящено множество работ, в которых указывается, что процесс измельчения характеризуется множеством факторов. Установлено, что одним из наиболее важных рабочих органов, влияющих на показатели работы дробилки, являются молотки, в частности, их форма, схема и способ установки на оси подвеса ротора, расстояние от концов молотков до поверхности решетки, степень износа и т.д.

Вопросами износа ударных рабочих органов занимались А.А. Петров, В.Н. Савченко, которые предложили методики по определению удельного износа ударных элементов от времени, замера интенсивности нарастания износа контактной части молотка, геометрической формы износа молотков дробилок для дальнейшего обоснования локального упрочнения участков рабочей поверхности молотка [3,4].

В ряде работ были получены зависимости удельного износа ударных органов различных типов дробилок. Так, В.В. Гоева и М.Ю. Колобов, анализируя аналогичные процессы, рассмотрели износ последней ступени молотка ступенчатой формы и предложили формулы по определению изнашивания молотков от количества переработанного материала, скорости движения рабочих органов, однако они не учитывали физико-механические свойства дробимого продукта [5,6].

Данные зависимости не в полной мере учитывают влияние такого фактора, характеризующего процесс дробления, как отклонение бил при соударении с частицей материала, и рассматривают износ поверхности как абразивный или усталостный механический, возникающий при скольжении частицы после ударного взаимодействия. Для определения интенсивности

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

износа ими была использована гипотеза Престона [7].

Таким образом, вопросы взаимодействия ударных элементов с дробимым материалом и условия работы молотка изучены пока еще не в полной мере. Некоторые предположения и их результаты носят достаточно противоречивый характер. Прогнозированию ресурса молотков и изучению их износа уделялось недостаточно внимания. Все это указывает на необходимость продолжения исследований, направленных на повышение эффективности использования молотковых дробилок при переработке различных материалов.

Цель (задачи) исследования

Задачами данного исследования являются разработка математической модели процесса изнашивания молотков на этапе их ударного взаимодействия с частицей материала, а также изучение влияния основных физико-технологических параметров процесса дробления материала в молотковой дробилке на износ ударных органов при фракционной подготовке известняка в условиях агломерационного цеха Филиала № 12 «Алчевский металлургический комбинат» ЗАО «Внешторгсервис» при неподвижном [8] и шарнирном способах установки молотков на оси подвеса ротора.

Основной материал исследования

Определение напряжений, возникающих при взаимном контакте материала с поверхностью молотка, с учетом трения, износа и разрушения представляет собой сложную математическую проблему. Описание данных процессов представляет собой отдельную составляющую задачу, не входящую в цели исследования. Поэтому для решения поставленных задач нахождения параметров взаимного контакта тел используем положения прикладной теории удара, делая допущения, дающие возможность построить модель, с помощью которой удастся получить как качественные, так и количественные оценки.

На основные показатели работы дробилки оказывают влияние режим работы (скорость и время обработки сырья), характеристика измельчаемого материала (абразивность, твердость, исходная фракция), форма, физико-химические свойства и способ упрочнения поверхности молотка. Также существенное значение имеют кинематические показатели процесса взаимодействия частицы с молотком (глубина внедрения материала в рабочую зону молотков c и угол отклонения рабочего органа в процессе ударного контакта).

На этапе соударения куски материала можно представить как макротело, состоящее из отдельных абразивных микрочастиц, образующихся в процессе измельчения. Из этих условий на основании анализа параметров кинематики молотка и материала [2], а также условий их контактного взаимодействия можно предположить, что в данном случае происходит эрозионный износ, возникающий при многочисленных ударных контактах частиц о рабочую поверхность ударного органа [9,10].

В статической теории удара Герца [11] относительная скорость тел при соударении равна нулю, и центр соударения (точка А) остается неподвижным (рис. 1). В случае использования данной теории в условиях ударного контакта молотка и частицы материала ротор рассматривается как система, состоящая из двух взаимосвязанных шарниров, вращающихся относительно центров вращения (рабочая зона молотков с радиусом вращения r и оси подвеса молотков с радиусом подвеса R).

Рассмотрим задачу, описывающую удар частицы материала по молотку. В этом случае он отклоняется на угол, определяющийся по формуле [2]:

$$\gamma = \left(1 + \frac{R}{r-c}\right) \frac{4}{\left(k_m + 1\right)\sqrt{\frac{(r-c)(R+r-c)}{r_u^2}}}, \quad (1)$$

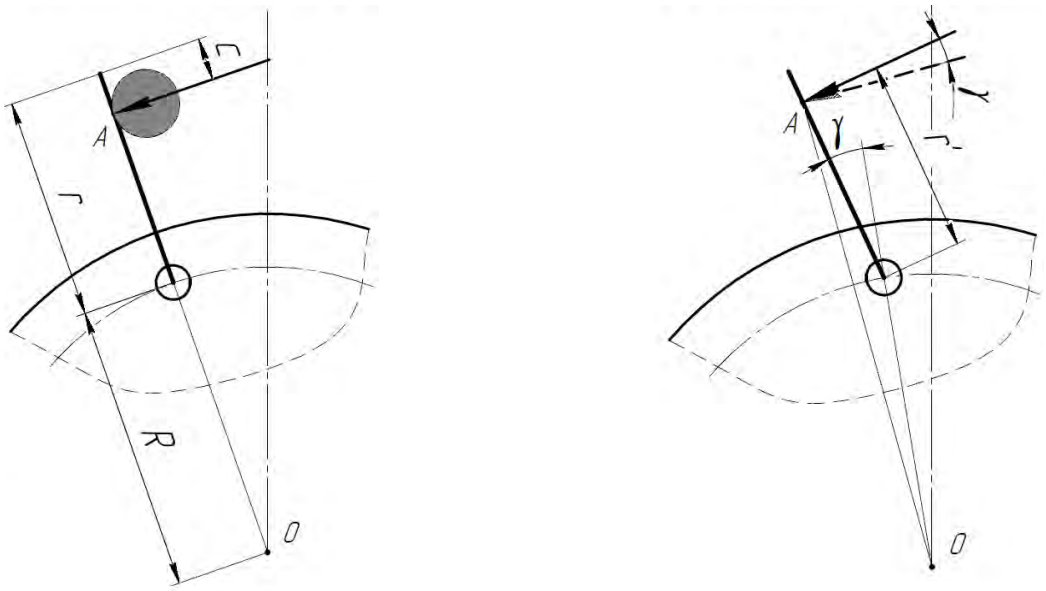
где k_m – коэффициент отношения массы молотков, участвующих в ударном контакте, $m_{\Sigma m}$, к массе частицы материала $m_ч$; r_u – радиус инерции бил относительно оси подвеса.

В этом случае угол между векторами линейных скоростей точки контакта на поверхности молотка в начальной и конечной стадии соударения можно считать углом атаки частицы, а объем изношенного материала молотка эмпирической зависимостью, основанной на формуле Финни (для углов атаки менее 18,5°) [12]:

$$V = \frac{v_y^2}{24 k_\sigma \sigma_м} \cos^2(90 - \gamma) \Rightarrow \frac{v_y^2}{24 k_\sigma \sigma_м} \sin^2 \gamma, \quad (2)$$

где V – объем изношенного материала, приходящийся на 1 кг дробимого продукта; v_y – скорость атаки (линейная скорость молотка в конечной стадии соударения) [13]; k_σ – эмпирический коэффициент предела прочности материала молотка при ударе; $\sigma_м$ – теоретическое значение предела прочности материала молотка.

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



а б

Рис. 1. Расчетная схема для определения угла атаки частиц в момент соударения с молотком: *а* – в начальной стадии удара; *б* – в конечной стадии удара

С учетом выражения (1) и скорости v_y объем изношенного материала на стадии ударного контакта молотков с дробимым материалом при его внедрении в рабочую зону дробилки будет определяться по формуле:

$$V_M = \frac{4\pi M \rho \omega r_u^2 (k_m - 1)^2 (R - c + r)^3}{3\sigma_м k_\sigma z (r - c)^3 (k_m + 1)^4}, \qquad (3)$$

где M – масса измельчаемого материала в дробилке; ρ – плотность материала молотка; ω – угловая скорость вращения ротора дробилки; z – количество рядов молотков, установленных на роторе.

С целью подтверждения теоретических предположений и изучения процесса изнашивания ударных органов применялась молотковая дробилка ДМРиЭ 14,5×13 без колосниковой решетки (рис. 2) в промышленных условиях производства агломерационного Филиала № 12 «Алчевский металлургический комбинат» ЗАО «Внешторгсервис».

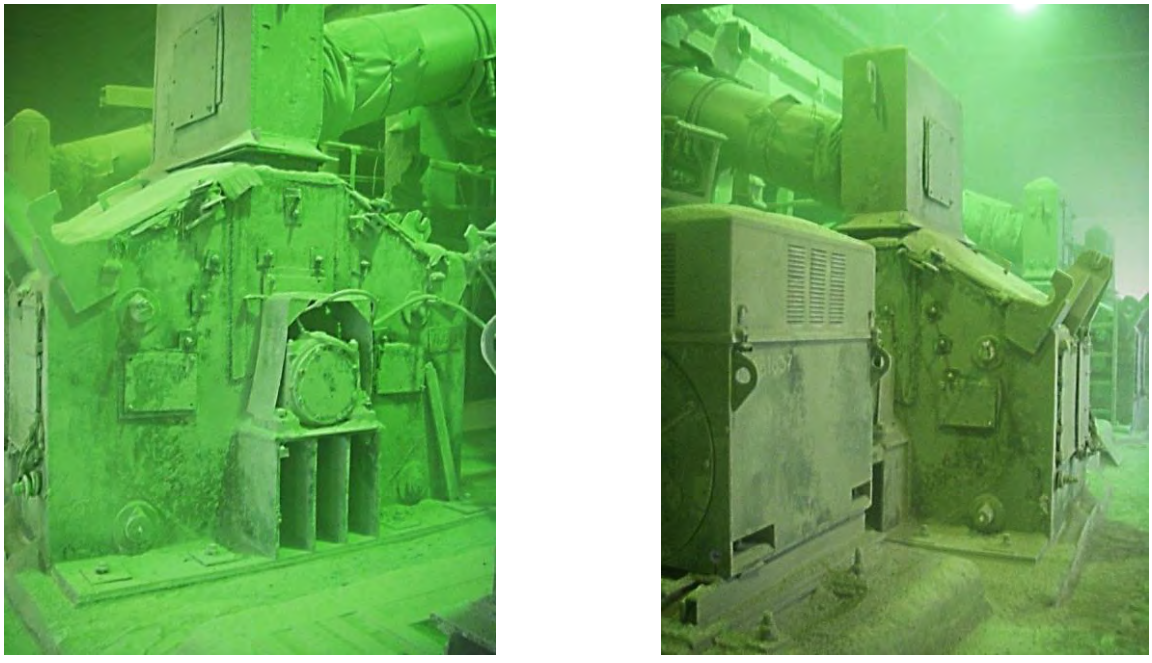


Рис. 2. Общий вид молотковой дробилки ДМРиЭ 14,5×13 в условиях агломерационного цеха Филиала № 12 «Алчевский металлургический комбинат» ЗАО «Внешторгсервис»

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

В ходе производственного эксперимента проводились промышленные испытания дробильного комплекса агломерационных флюсов. При этом использовались обычный шарнирный (рис. 3а) и новый предложенный комбинированный способ подвеса молотков на оси (рис. 3б), при котором все молотки на оси подвеса крепятся неподвижно, а сама ось в отверстиях ротора установлена шарнирно.

Технико-эксплуатационные характеристики дробилки при проведении опытов: угловая скорость вращения ротора – 78,5 $с^{-1}$; масса нового молотка – 17,07 кг; радиус подвеса молотка – 0,43 м; расстояние от оси подвеса до внешней грани ударной части молотка – 0,295 м; теоретическая глубина внедрения частицы материала в рабочую зону – 0,068 м; количество молотков на оси – 12; количество рядов молотков на роторе – 5; теоретическое значение предела прочности материала молотка – 450 МПа. В качестве сырья использовался доменный известняк фракцией 40…100 мм, насыпной плотностью 2800 кг/$м^3$ и влажностью 4…8 %.

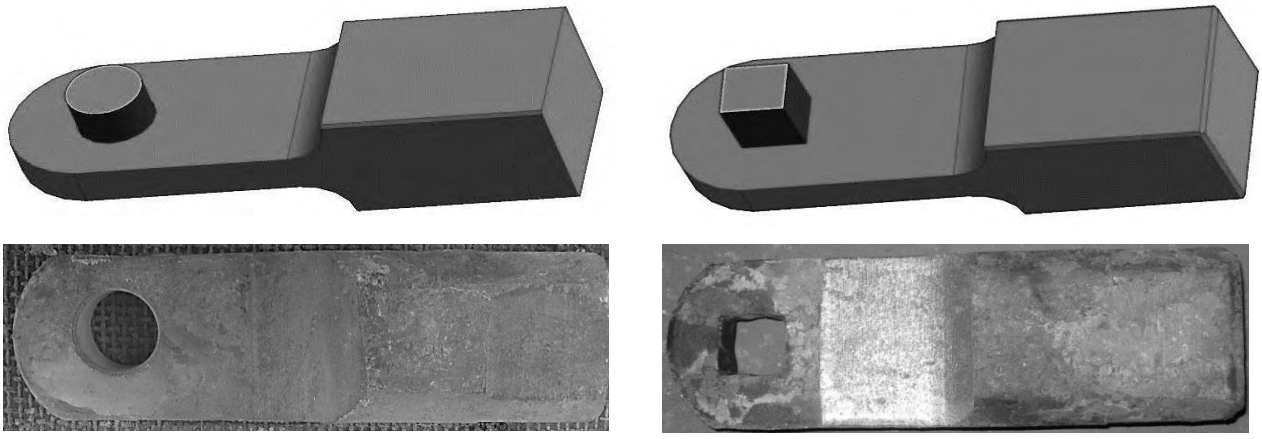
Для проведения многофакторного эксперимента применялось центральное композиционное ротатабельное униформпланирование второго порядка [14]. В качестве основных факторов, определяющих износ молотков при дроблении известняка, выбирались:

– масса молотков, соударяющихся с частицей массой $m_{\Sigma m}$;

– средняя масса $m_ч$ частиц флюсов, поступающих на дробление.

Необходимая масса молотков для проведения экспериментов обеспечивалась за счет определенного количества жестко закрепленных молотков новой конструкции на каждой оси подвеса, остальные молотки устанавливались шарнирно (использовалась типовая конструкция). Для моделирования функции износа требовался интервал варьирования фактора массы молотков, находящийся в непосредственной близости к нижней звездной точке, так как при больших коэффициентах масс k_m угол отклонения стремится к нулю. Для этого использовались изношенные с одной стороны молотки (после эксплуатации без реверса), массой близкой к 13 кг. При комбинировании с молотками новой конструкции задавались необходимые уровни в матрице планирования (табл. 1). Среднее отклонение от необходимого уровня составило порядка 1 %.

Для определения степени износа молотков для каждой из комбинаций факторов согласно матрице планирования (табл. 1) после дробления 500 тонн известняка оборудование останавливалось, молотки фотографировали без демонтажа и методом профилографирования определяли профиль и массу изношенной части бойка (рис. 4).



а б

Рис. 3. Трехмерная модель и внешний вид молотков:
а – с шарнирным способом крепления; *б* – с комбинированным способом крепления

Табл. 1. Интервалы варьирования факторов для модели износа молотков

Параметр	$x_1(m_{\Sigma m})$, кг	$x_2(m_ч)$, кг
Основной уровень, x_i=0	26,4	0,16
Интервал варьирования, I	9,33	-0,011
Верхний уровень, x_i=+1	35,73	0,05
Нижний уровень, x_i=-1	17,07	0,27
Верхняя звездная точка, x_i=+1,414	39,6	0,32
Нижняя звездная точка, x_i=-1,414	13,2	$4{,}02\times10^{-3}$

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



Рис. 4. Профилографирование износа молотков

После переработки 2000 тонн известняка молотки демонтировали, и проводилось взвешивание каждого из них на механических весах. Затем производился обратный монтаж молотков и повторное испытание. Число опытов для каждой комбинации молотков старой и новой конструкции принималось равным трем.

При проведении повторных экспериментов в процессе эксплуатации молотковой дробилки получены следующие значения износа молотков (табл. 2).

Коэффициенты регрессии находили по формулам [14]. Проверка воспроизводимости эксперимента проводилась по критерию Кохрена.

После определения значимости коэффициентов по критерию Стьюдента получена адекватная регрессионная зависимость:

$$y_2(x_1,x_2) = -0{,}035x_1 - 0{,}054x_2 + 0{,}022x_1^2 - \\ - 8{,}377\cdot 10^{-3}x_2^2 + 0{,}024x_1x_2 + 0{,}148. \quad (4)$$

Адекватность модели подтверждалась по критерию Фишера [17].

В раскодированном (натуральном) виде математическая модель износа молотков выглядит как:

$$V_{ЭМ} = 0{,}737m_ч^2 - 0{,}025m_ч m_{\Sigma м} + \\ + 0{,}924m_ч + 2{,}519\cdot 10^{-4}m_{\Sigma м}^2 - \\ - 0{,}013m_{\Sigma м} + 0{,}263. \quad (5)$$

Для определения поправочного коэффициента при определении предела прочности материала молотка при ударе сопоставим результаты, полученные по формуле (3) (с коэффициентом k_σ=1), и значения массы изношенного материала молотка при экспериментальном измельчении флюса (фактический износ молотка определяем по формуле (4)) при различных комбинациях двух факторов (табл. 3).

Табл. 2. Показатели износа молотков согласно матрице планирования

№ опыта	Показатель износа при различных уровнях матрицы планирования, кг/2000 т												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,29	0,18	0,12	0,11	0,26	0,14	0,23	0,11	0,17	0,15	0,14	0,14	0,15
2	0,29	0,18	0,12	0,1	0,25	0,14	0,24	0,10	0,17	0,15	0,14	0,14	0,15
3	0,29	0,18	0,12	0,11	0,26	0,14	0,24	0,10	0,16	0,14	0,14	0,15	0,14

Табл. 3. Экспериментальные и теоретические значения величины износа

Показатель	Износ молотков при различных уровнях матрицы планирования, кг/2000 т									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9…13	Среднее значение k_σ
$V_{ЭМ}$	0,29	0,17	0,14	0,12	0,24	0,14	0,24	0,09	0,15	
V_M	0,052	0,031	0,024	0,022	0,041	0,025	0,041	0,022	0,029	
k_σ	5,6	5,6	5,6	5,1	5,8	5,7	5,9	4,1	5,2	5,348

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

Эмпирический коэффициент для определения предела прочности молотка при ударе определяется по формуле:

$$k_{\sigma} = \sum \frac{V_{\Sigma \ni i}}{V_{\Sigma mj}} \cdot N^{-1} \qquad (6)$$

Опытный коэффициент при дроблении известняка составил k_{σ}=5,348.

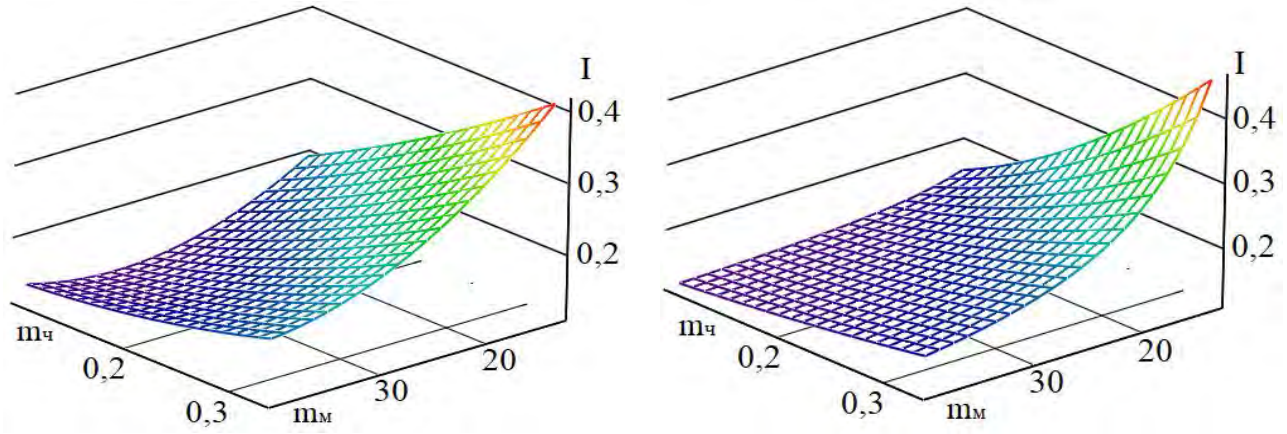
Отклонение теоретических результатов от опытных значений, полученных при экспериментальных исследованиях в промышленных условиях, не превысило 12,6 %, что подтверждает достоверность предложенных теоретических методов по определению износа молотков в процессе диспергирования материалов в горизонтальной молотковой дробилке.

Для наглядного отображения адекватности формулы (3) и опытных данных (определенных с помощью регрессионной модели (5) построены графики поверхностей (рис. 5), отображающие зависимости величин износа молотков от их массы в ряду и массы частиц известняка.

На практике использовать различное количество жестко закрепленных молотков на оси подвеса нецелесообразно, так как это усложняет техническое обслуживание дробилки (балансировку ротора, замену вышедших из строя молотков). Для эксплуатации рекомендуется использовать полную навеску молотков комбинированной конструкции (для условий ДМРиЭ 14,5×13 – 12 шт.).

На рис. 6 показаны графики зависимостей износа молотков от массы фракции известняка при шарнирном и комбинированном способах установки всех молотков на оси подвеса. Из анализа данных зависимостей видно, что при комбинированном способе крепления молотков на оси подвеса ротора износ на начальной стадии эксплуатации молотков значительно меньше.

В процессе эксплуатации дробилки в штатном режиме (с колосниковой решеткой) в течение 90 суток установлено, что при использовании предложенной конструкции крепления молотков наблюдается снижение среднего значения износа ударных рабочих узлов за счет уменьшения и стирания при ударном контакте с материалом от 0,413 до $0{,}379 \cdot 10^{-4}$ кг/т.



а *б*

Рис. 5. Графики зависимостей износа молотков:
а – экспериментальная; *б* – теоретическая

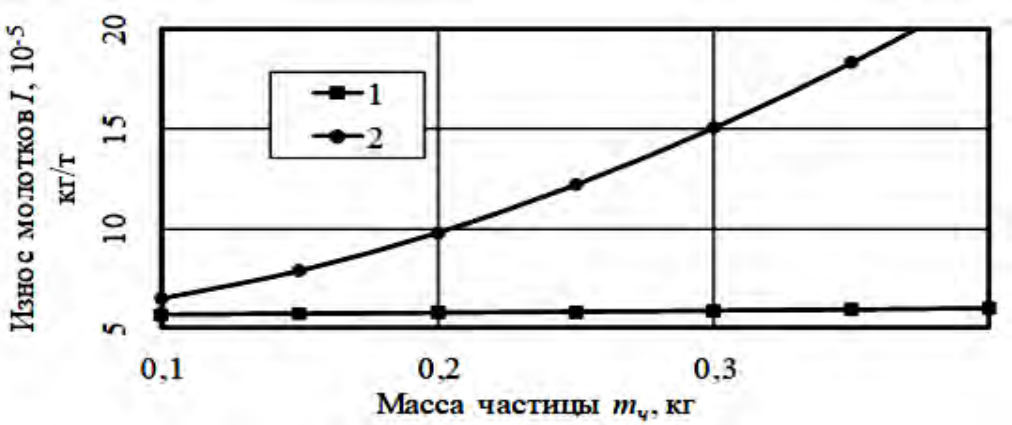


Рис. 6. Графики износа молотка дробилки ДМРиЭ 14,5×13 с использованием:
1 – комбинированного способа крепления; *2* – шарнирного способа крепления

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

Также увеличилась интенсивность изнашивания отбойной плиты вследствие возрастания скорости движения частиц материала после контактного взаимодействия с билами и выросла степень износа колосников, что обуславливается влиянием массы молотков на увеличение давления частицы материала при взаимодействии с колосниковой решеткой (за счет возрастания центробежных сил тел, взаимодействующих в процессе контакта).

Таким образом, для дальнейших исследований перспективным направлением является изучение метода комбинационного синтеза дробильно-измельчительных машин, направленного на реализацию сочетания достоинств в одном устройстве машин роторного и молоткового типов и определение их основных технико-экономических показателей при дроблении различных шихтовых материалов. В настоящее время работы в этом направлении проводятся в Донбасском государственном техническом университете с привязкой к агломерационному производству Филиала № 12 «Алчевский металлургический комбинат» ЗАО «Внешторгсервис».

Выводы

Полученная математическая модель износа ударных органов при взаимодействии с частицей известняка с учетом угла отклонения молотков, скорости соударения с материалом и эмпирического коэффициента позволяет с достаточной степенью достоверности прогнозировать ресурс молотков в процессе дробления известняка.

Износ ударных рабочих органов с комбинированной заделкой молотков на оси ротора меньше, чем у дробилок с шарнирным креплением.

Перспективным направлением диспергирования флюсов с точки зрения повышения эксплуатационных характеристик молотковых дробилок является синтез их новых конструкций, совмещающих в себе сочетание жесткого крепления молотков в подвесе при возможности их предохранения от разрушения, например, за счет потери жесткости в момент контакта с недробимыми телами.

Результаты исследования могут послужить для развития теории расчета технико-эксплуатационных параметров ударных дробильных машин, а также расширить при соответствующей адаптации методику количественного сопоставительного анализа эффективности различных конструкций молотковых дробилок, применяемых при дроблении различных материалов на других предприятиях черной металлургии и в других отраслях промышленности.

Список литературы

1. Реутова, Я.И. Износ рабочих элементов роторной дробилки / Я.И. Реутова, В.С. Богданов // Молодежь и научно-технический прогресс: материалы IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 14 апреля 2016 г., Губкин. – 2016. – С. 47-49.
2. Власенко, Д.А. Влияние крупности сырья на кинематику рабочих органов и материала в молотковой дробилке / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Вестник ДонНТУ. – 2018. – №3. – С. 9-15.
3. Петров, А.А. Повышение надежности рабочих органов кормодробилок молоткового типа: автореф. дисс. … канд. техн. наук: 05.20.03 / Петров Алексей Анатольевич. – Оренбург; ОГАУ, 2007. – 17 с.
4. Савченко, В.М. Розробка молотків кормодробарок з локальним зносостійким покриттям: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.05.11 / Савченко Василь Миколайович. – Кіровоград, КНГУ, 2008. – 20 с.
5. Гоева, В.В. Определение износа молотков и лопаток вентилятора молотковой дробилки зерна / В.В. Гоева // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: материалы X Международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение» 7 февраля 2017 г., Киров. Сборник научных трудов, посвященный 65-летию со дня образования инженерного факультета Вятской ГСХА. – 2017. – С. 104-109.
6. Колобов, М.Ю. Энергосберегающая технология и технические средства центробежного действия для обработки дисперсных материалов сельскохозяйственного назначения: автореф. дис. … док. техн. наук: 05.20.01 / Колобов Михаил Юрьевич. – Рязань, ИГСА имени академика Д.К. Беляева, 2010. – 39 с.
7. Preston, E.W. The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines / Journal of the Society Technology. – 1927. – No.11. – P. 214-256.
8. Пат. 179695 РФ, МПК B02C 13/16. Ротор молотковой дробилки / Д.А. Власенко, А.В. Карпов. – № 2018106733; заявл. 22.02.2018; опубл. 22.05.2018.
9. Колесников, Ю.В. Механика контактного разрушения / Ю.В. Колесников, Е.М. Морозов – М.: Изд-во ЛКИ, 2012. – 224 с.
10. Laursen, T.A. Computational Contact and Impact Mechanics: Fundamentals of Modeling Interfacial Phenomena in Nonlinear Finite Element Analysis. – New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – 454 p.

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

11. Hertz, H. Über die Berührung fester elastischer Körper / H. Hertz // Journal fur die reine und angewandte Mathematik. – Iss.92. – Vol.1882. – 2009. – P. 156-171.
12. Finnie, I. Erosion of Surfaces by Solid Particles / I. Finnie // Wear. – 1960. – Vol.3. – P. 87-103.
13. Власенко, Д.А. Влияние способа крепления молотков на оси ротора на скорость движения известняка к отбойной плите в ударной дробилке / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Сб. науч. тр. Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2017. – Вып.48. – С. 180-184.
14. Белай, Г.Е. Организация металлургического эксперимента: учеб. пособ. для вузов / Г.Е. Белай, В.В. Дембовский, О.В. Соценко / под ред. В.В. Дембовского. – М.: Металлургия, 1993. – 256 с.

D.A. Vlasenko, E.P. Levchenko /Cand. Sci. (Eng.)/, G.A. Bilan
Donbass State Technical University (Alchevsk)

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF HAMMERS WEAR AT FREE IMPACT CRUSHING THE MATERIAL

Background. *Crushing processes are very energy-intensive and involve a large loss of metal due to wear of working elements in the operation of crushing machines. This fact determines the importance of studying and improving these processes in order to increase the service life of individual working bodies and units of hammer mills and increase the productivity of crushing machines.*
Materials and/or methods. *The used mathematical model based on Newton's second law (the differential law of mechanical motion) and Hertz's static shock theory. The aim of this study is to determine the angular position of the hammers relatively to their radial position in the final stage of impact on the particle and the shift values of the material under the displacement relative to the working surface of the hammer at the impact contact in the crusher in the process of preparing fluxes with the combined and hinge mount of a beater on the suspension axis of the rotor.*
Results. *The results obtained of the mathematical modeling of the process of hammer and particle collision with the combined and hinge attachment of the hammers to the suspension axis of the rotor. Determined the dependence of the values of the deflection angle and the shift of particles on the hammer impact surface on the fractional composition of the crushed material in the process of collision. The values of wear of the working bodies of the hammer crusher in the course of industrial experiment determined.*
Conclusion. *The deflection angle of a pivotally suspended hammer in the final phase of collision in the hammer mill increases significantly with increasing the fraction of the crushed material, and not significantly changed with the combined attachment. As the angle value increases, the wear of the working surface of the hammer increased by sliding the flux particle along the working surface of the hammer. With the hinge attachment, the trajectory of the material in the working space of the crusher does not provide the entry of the dominant number of material pieces in the area of a bumper plate. Thus, when using a new design of hammer attachment, the wear of individual working bodies of the crusher reduced and the service life increased. The performance of hammer crushers with a combined mount of hammers on the rotor axis is higher compared to crushers having their hinge mount.*

Keywords: *hammer crusher, hammer, deflection angle, the shift value of the particles at the impact surface.*

Сведения об авторах

Д.А. Власенко
SPIN-код: 6296-2040
Телефон: +380 (72) 112-82-33
Эл. почта: vlasdmitrij@yandex.ru

Г.А. Билан
Телефон: +380 (95) 340-17-09
Эл. почта: biga080914@gmail.com

Э.П. Левченко
SPIN-код: 8607-5905
Телефон: +380 (72) 154-74-30
Эл. почта: levchenckoeduard@yandex.ua

Статья поступила 11.01.2019 г.
© Д.А. Власенко, Э.П. Левченко, Г.А. Билан, 2019
Рецензент д.т.н., доц. Н.А. Ченцов

ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Вековые традиции
Инновационные технологии

ПРИГЛАШАЕМ К СОТРУДНИЧЕСТВУ

УДК 622.223

Н.Г. Афендиков /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ПОРТАТИВНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Разработано портативное устройство для определения прочностных свойств горных пород (преимущественно калийных солей) методом резания. Основными особенностями устройства являются: уменьшенные размеры измерительных резцов в сравнении с резцами ДКС, регистрация замеряемых параметров на электронном устройстве с дисплеем, малые габариты и вес, быстрые и эффективные замеры, низкая трудоемкость выполняемых работ по определению сопротивляемости резанию.

Ключевые слова: *прочностные свойства, горные породы, измерительные резцы, регистрация, низкая трудоемкость.*

Постановка проблемы

В настоящее время на горных предприятиях стран СНГ для разрушения горных пород при разработке пластовых месторождений полезных ископаемых подземным способом, как известно, широко применяются очистные и проходческие комбайны. Очистные комбайны распространены почти во всех очистных забоях (примерно 100 %), а проходческие комбайны также широко применяются в забоях подготовительных выработок (примерно в 50…60 % всех подготовительных забоев). Кроме этого, на шахтах применяются струги, скреперо-струги, шнекобуровые установки, буровые станки для бурения скважин, бурильные установки для бурения шпуров и другие машины, разрушающие горные породы.

Для обоснованного выбора из перечня выпускаемых в настоящее время горных машин применительно к конкретным горно-геологическим условиям, а также для обоснованного выбора рациональных параметров режимов работы исполнительных органов и их приводов, как при проектировании, так и при совершенствовании существующих машин, необходимо знание прочностных характеристик разрушаемых массивов пластов. Прочностные характеристики горных пород необходимы также для планирования расхода рабочего инструмента очистных и проходческих комбайнов, нормирования труда рабочих выемочных и подготовительных забоев, а также для рационального выбора мощности приводов и энергоснабжения горных участков. Прочностные свойства горных пород замеряются устройствами и приборами для определения крепости, прочности и сопротивляемости резанию.

Поэтому сегодня существует проблема проведения исследований, направленных на разработку устройств, необходимых для получения достоверных значений сопротивляемости горных пород резанию в реальных шахтных условиях быстро, эффективно, с большой точностью и при небольших затратах труда.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ литературных источников, содержащих результаты научных исследований, а также анализ авторских свидетельств и патентов на изобретения показал, что проблемой разработки способов и устройств для определения прочностных свойств горных пород занимались во многих странах мира: в Советском Союзе и странах СНГ [1…17], Германии [18,19], Великобритании [20], США [21], Японии [22,23] и других странах. В настоящей работе выполнен анализ значительного числа (более 100) опубликованных результатов исследовательских работ и выданных охранных документов на изобретения, но из-за ограниченного объема статьи в списке литературы эти работы приводятся частично.

На основе анализа патентных материалов и источников научно-технической литературы все существующие способы определения прочностных свойств горных пород можно условно разделить на две большие группы:

– лабораторные способы определения прочности, крепости или твердости горных пород;

– способы, позволяющие определять прочностные свойства пород непосредственно в подземных условиях в породном массиве.

Обе группы имеют ряд преимуществ и недостатков.

Лабораторные способы позволяют использовать высокоточные приборы и установки, дающие возможность устанавливать во взаимосвязи

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

между собой сразу несколько показателей, характеризующих прочностные свойства образцов горных пород. Однако, определенные такими методами прочностные свойства образцов горных пород, зачастую не отражают состояние массива в целом из-за ряда факторов. Основными такими факторами являются масштабный фактор; напряженное состояние массива, обусловленное горным давлением; влажность, газоносность пласта и др. Кроме этого, отбор проб из массива и доводка их до размеров, необходимых для лабораторных испытаний, затрудняет применение данных способов при быстром во времени и точном измерении прочностных свойств горных пород в подземных условиях.

Классический общепризнанный способ измерения прочностных свойств горных пород резанием описан в работах [9,10]. Этот способ основан на использовании установки ДКС, позволяющий определять непосредственно в забое характеристики процесса резания, такие как средние усилия резания, значения удельных энергозатрат, ширины и угла борозды резания. Определение данных величин позволяет достаточно полно оценивать способность горных пород противостоять механическим воздействиям рабочего инструмента на массив при резании.

Установка ДКС включает распорную стойку, с закрепленной на ней с возможностью поворота в горизонтальной плоскости державки, с эталонным резцом. Эталонный резец имеет угол резания – 50°, задний угол – 10°, ширину режущей кромки – 20 мм, плоскую переднюю грань. Между державкой и распорной стойкой устанавливается лебедка, создающая тяговое усилие, величина которого измеряется динамометром и регистрируется самопишущим устройством.

Сопротивляемость резанию определяется как отношение средней за один срез силы резания к толщине стружки эталонным резцом при резании с выровненной поверхности исследуемого массива горной породы. Значения показателей сопротивляемости определяются в нескольких точках по мощности пласта и в нескольких положениях вдоль забоя. Это позволяет определить усредненный показатель сопротивляемости горной породы резанию для исследуемого забоя.

Недостатками устройства ДКС являются: его громоздкость, большие затраты труда по доставке оборудования в шахту, в очистной или проходческий забой, значительная трудоемкость монтажа и обслуживания установки, необходимость подвода электрической энергии для питания электродвигателя лебедки, а также необходимость выравнивания поверхности забоя перед каждым измерительным резом. Большие затраты времени также требуются на обработку полученных осциллограмм усилий резания. Все перечисленное значительно снижает возможность и эффективность использования данной установки.

В работе [11] описана конструкция устройства для определения горных пород резанию, состоящего из штанги, груза и резца. Работает устройство следующим образом.

В массиве горной породы подготавливается уступ, состоящий из взаимно перпендикулярных вертикальной и горизонтальной поверхностей. После этого с высоты сбрасывается груз Q некоторое число раз. В грузе имеется отверстие для перемещения по штанге. Груз ударяет по резцедержателю со штангой и резцом. За счет энергии падания груза резцом срезается стружка h и замеряется пройденный им путь L.

Расчет сопротивляемости породы резанию определяется по затратам энергии, пути перемещения главной режущей кромки резца при постоянном значении толщины стружки h.

К недостаткам данного способа определения сопротивляемости резанию пород относится необходимость подготовки в массиве пласта специального уступа, состоящего из вертикальной и горизонтальной поверхностей, причем пространство над горизонтальной поверхностью должно быть достаточным для размещения в нем устройства для измерения сопротивляемости резанию. Следует отметить низкую точность измерения сопротивляемости резанию в сравнении с другими способами.

Устройство, описанное в авторском свидетельстве на изобретение [12], позволяет определять сопротивляемость горной породы резанию. Принцип работы устройства заключается в том, что на исполнительном органе комбайна закрепляются два резца, один из которых зачистной, с широкой режущей кромкой, производит подготовку выровненной поверхности, а другой резец, расположенный позади зачистного резца с превышением, производит резание стружки с регистрацией нагрузки. Толщина стружки h на отстающем (измерительном) резце не зависит ни от скорости подачи комбайна, ни от скорости резания и остается постоянной. Значения скоростей резания и подачи влияют только на толщину среза опережающего, зачистного, резца. Величина нагрузки на отстающем резце при разрушении с выровненной поверхности стружкой постоянной толщины пропорциональна показателю сопротивляемости резанию горной породы, определенному при помощи резца ДКС. Замеры моно производить не только в отдельных точках, но и по всей длине лавы.

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

Недостатком этого способа определения сопротивляемости резанию является следующее: замеры можно производить только в зоне работы исполнительного органа комбайна, т.е. применение этого способа невозможно для замеров сопротивляемости в разрезных печах и в других забоях; износы зачистного и измерительных резцов, которые всегда наблюдаются при работе комбайнов, снижают точность измерений.

В работах [6,13] описаны конструкции устройств, предназначенных для определения сопротивляемости резанию горных пород в шпуре и в скважине. Работают эти устройства следующим образом.

Предварительно в массиве породы пробуривают бурильной машиной или буровым станком соответственно шпур или скважину. В пробуренные полости шпура или скважины вводятся режущие головки с измерительными резцами, утопленные в резцедержатель. Затем после упора режущей головки в забой шпура или скважины с помощью винтового механизма измерительные резцы поворачиваются и занимают рабочее положение для резания. При вытягивании режущей головки из шпура или скважины происходит срезание породы со стенок полостей с постоянными толщинами, усилия резания записываются регистрирующими приборами. Так как срезание породы в шпурах или в скважинах происходит при постоянных толщинах среза, то усилия, зафиксированные при резании, являются пропорциональными сопротивляемости породы резанию.

Недостатками этих устройств являются большая трудоемкость подготовительных работ, связанная с необходимостью бурения шпуров или скважин, что, в свою очередь, требует прокладки кабелей электропитания, доставки бурильных машин или бурильных станков к месту измерения, а затем и измерение сопротивляемости породы резанию.

Наибольшее распространение [14,15] в промышленности и при проведении исследований получили методы, основанные на разбуривании сверлом СДМ предварительно пробуренных шпуров и фиксации при этом усилий резания, пропорциональных сопротивляемости породы резанию, а также разбуривании ПК-1 предварительно пробуренных шпуров и фиксации при этом с помощью мессдозы осевого усилия, пропорционального сопротивляемости породы резанию.

Недостатки этих методов, основанных на разбуривании шпуров, аналогичны недостаткам работы установкам ДКС и устройствам для определения сопротивляемости породы резанию в шпурах и скважинах, т.е. высокая трудоемкость, связанная с бурением шпуров, необходимостью прокладки линий электрического снабжения устройств ДКС и ПК-1.

Кроме описанных выше устройств, в настоящем исследовании анализировались конструкции различных установок для определения прочности бетона, разрыхления мерзлых грунтов, а также устройства для определения прочностных свойств горных пород ударными методами.

Из анализа научно-технической литературы и патентных охранных документов технически развитых стран установлено:

– способы, позволяющие определять прочностные свойства горных пород непосредственно в массиве пласта, имеют значительные преимущества перед лабораторными способами и устройствами, так как обеспечивают получение более достоверных значений его физико-механических свойств;

– большинство способов и устройств по определению сопротивляемости пород резанию в реальных шахтных условиях не пригодны для быстрого и эффективного исследования прочностных свойств горных пород из-за громоздкости применяемого оборудования, необходимости подведения к нему электрического питания, больших затрат труда и времени на проведение замеров.

Поэтому задача создания портативной установки, позволяющей с небольшими затратами труда и времени быстро, эффективно и достоверно определять прочностные свойства горных пород является актуальной.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящего исследования является разработка портативного прибора для определения прочностных свойств горных пород (преимущественно сопротивляемости резанию калийной соли) в реальных шахтных условиях.

Для достижения этой цели поставлены задачи по проведению анализа литературных источников и патентных материалов технически развитых существующих способов конструкций по определению прочностных свойств гонных пород. На основе анализа способов и конструкций устройств по определению прочностных свойств горных пород принималось, что способ и прибор должны определять сопротивляемость резанию калийной соли с поверхности забоя.

Основной материал исследования

При разработке требований к портативному прибору для определения прочностных свойств

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

горных пород применительно к калийным солям в реальных подземных условиях учитывались следующие обстоятельства.

Первым вопросом, стоящим при разработке портативного прибора для определения прочностных свойств массива калийного пласта, является: какие прочностные свойства необходимо замерять этим устройством.

Как отмечалось в работах [9,10,14], определение прочностных характеристик горных пород, необходимых для оценки нагрузок, действующих на исполнительные органы горных машин с режущим инструментом, должно основываться на резании. Причем этими работами предлагается показатель сопротивляемости резанию, интегрально учитывающий прочностные характеристики составляющих пород массива пласта, их упругие свойства, а также влажность, газоносность, трещиноватость, горное давление и другие факторы. Этот показатель широко используется в угольной промышленности при расчете сил резания, выборе рациональных режимов работы исполнительных органов очистных и проходческих комбайнов, разрушающих угольные пласты.

Сопротивляемость резанию горных пород определяется установками при резании с поверхности забоя ДКС [9] и при разбуривании шпура в массиве пласта СДМ [16]. Однако эти установки являются громоздкими, требующими больших затрат труда и времени на доставку их в забой, монтаж, работу с целью получения осциллограмм с записями усилий резания, демонтаж, транспортировку в новое место работы, а также больших затрат времени на обработку осциллограмм для получения необходимых значений сопротивляемости резанию горной породы.

При разработке устройства для определения сопротивляемости резанию калийной соли в настоящей работе ставится задача устранения недостатков, присущих установкам ДКС и СДМ, т.е. снижения трудоемкости проведения замеров за счет уменьшения габаритов и массы установок.

Первоочередным вопросом при решении этой задачи являлось выяснение целесообразности разработки устройства для резания с поверхности забоя или для резания внутри массива (шпура).

Работами [17], проведенными в Верхнекамском и Старобинском месторождениях калийных солей, установлено, что сопротивляемость резанию пласта калийной соли по ширине захвата исполнительного комбайна не уменьшается из-за отжима, что наблюдается на угольных пластах, и остается практически постоянной. Поэтому при разработке способа и устройства для оперативного определения прочностных свойств калийной соли нет необходимости основываться на определении сопротивляемости резанию внутри массива пласта.

Вторым вопросом, стоящим при разработке способа определения сопротивляемости резанию пласта калийной соли, был вопрос снижения массы и размеров установки за счет уменьшения регистрируемых усилий резания, а также за счет отказа кабельного подвода к устройству электрической энергии.

По данным работы [17], сопротивляемость резанию пласта калийной соли в Старобинском и Верхнекамском месторождениях достигает значения 6 кН/см. Следовательно, для разработки портативного устройства необходимо, чтобы регистрируемое усилие резания, по сравнению с установкой ДКС, было примерно в 10…15 раз меньше. Уменьшить усилия резания измерительным резцом можно за счет двух параметров – толщины среза и ширины режущей кромки резца.

Для оценки степени необходимого уменьшения толщины и ширины среза воспользуемся выражением:

$$Z_n = K_y \cdot Z_{ДКС}, \quad (1)$$

где Z_n – регистрируемое усилие резания портативным прибором; $Z_{ДКС}$ – регистрируемое усилие резания установкой ДКС; K_y – коэффициент уменьшения усилия резания за счет изменения толщины среза и ширины режущей кромки резца.

$$K_y = K_{yh} \cdot K_{yв}, \quad (2)$$

где K_{yh}, $K_{yв}$ – коэффициенты уменьшения усилия резания за счет соответственно уменьшения толщины среза и изменения ширины режущей кромки резца.

В связи с тем, что влияние толщины среза на усилия резания резцом ДКС принято считать линейным и пропорциональным, значения K_{yh} можно определить по выражению:

$$K_{yh} = \frac{h_n}{h_{ДКС}}, \quad (3)$$

где h_n и $h_{ДКС}$ – соответственно толщина среза портативным прибором и толщина среза резцом ДКС.

Т.к. $h_{ДКС}$=1 см, то:

$$K_{yh} = h_n. \quad (4)$$

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

Коэффициент $K_{ув}$ определялся по зависимостям [17] влияния ширины режущей кромки резца *в* на усилия резания:

$$K_{ув}=0,3+0,35в. \quad (5)$$

Из выражений (1…5) определены значения $h_п$=0,3 см и $в_п$=0,2 см (здесь $в_п$ – ширина режущей кромки измерительного резца прибора), коэффициент $K_у$=0,08, т.е. уменьшение усилия резания резцом портативного прибора в сравнении с резцом ДКС будет равно: 1/0,08=12,5, т.е. примерно 12.

Вместе с тем следует иметь в виду, что уменьшение толщины среза и ширина режущей кромки резца может привести к искажению полученных результатов. Поэтому для установления связи показателей сопротивляемости резанию калийной соли резцом ДКС со значениями усилий резания уменьшенным резцом и с уменьшенной толщиной среза проведены экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования необходимы также для установления рациональных значений толщины среза и ширины режущей кромки резца портативного прибора. Эти значения должны быть с одной стороны достаточно малыми, чтобы не затруднять работу ручного привода, но при этом регистрируемые сигналы от резца должны быть достаточно большими для получения электрических сигналов, пропорциональных значениям усилий резания, с высокой точностью.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях на стенде (рис. 1), конструкция которого разработана на кафедре «Горные машины» ДонНТУ под руководством автора и защищена авторским свидетельством на изобретение [24].

Стенд состоит из поперечно-строгального станка 1, тензодинамометров с исследуемыми резцами 2, блоков калийной соли, вырезанных из массивов пластов рудников ПО «Белоруськалий», покрытых специальными изоляционными лаками и мастиками и закрепленных на суппорте станка 3. Также стенд включает регистрирующую и усилительную аппаратуру 4.

Резание производилось поперек напластованию с выровненной поверхности блока с постоянной толщиной среза. Для исключения взаимного влияния резов резцов ДКС расстояние между ними принималось не менее 250 мм.

Толщина среза устанавливалась по нониусу каретки суппорта строгального станка, после каждого опыта ее величина контролировалась штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Полученные в каждом опыте записи на осциллографической ленте усилий резания обрабатывались с целью установления значений их математических ожиданий, которые использовались для определения сопротивляемости калийной соли резанию. После каждого реза резцом ДКС на блоке калийной соли образовывалась полоска ровной поверхности шириной 20 мм. На этих поверхностях производились резы уменьшенным резцом с толщиной среза 0,3 см при ширинах режущих кромок резцов 0,2 см и 0,3 см, при углах резания 50° и при задних углах 10°. Эти усилия резания регистрировались на осциллограмме, и после обработки, также как и для резца ДКС, устанавливались их математические ожидания.

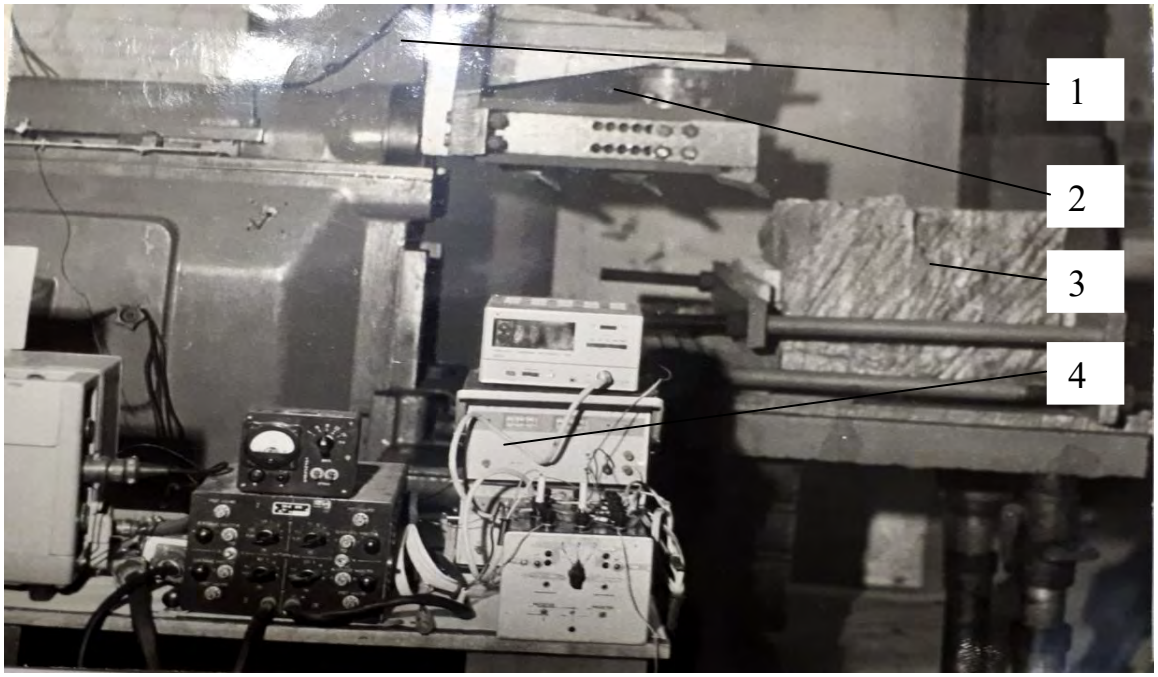


Рис. 1. Стенд для исследования разрушения калийной соли

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

Затем полученные экспериментальные данные резания резцами ДКС и уменьшенными резцами обрабатывались на компьютере с целью получения корреляционной зависимости между исследуемыми факторами. Результаты исследований в виде графиков зависимостей сопротивляемости резанию калийной соли от усилий резанию уменьшенными резцами приведены на рис. 2. Из графиков видно, что существует связь между сопротивляемостью резанию калийной соли и усилиями резания уменьшенными резцами. Значения коэффициентов корреляции при этом составляют примерно 0,95…0,97. Это свидетельствует о высокой точности измерений сопротивляемости резанию калийной соли уменьшенными резцами портативного прибора.

При разработке конструкции устройства для определения сопротивляемости резанию калийной соли ставились следующие требования.

Первым требованием к портативному устройству являлась необходимость зачистки поверхности забоя, на которой производится замер сопротивляемости резанию. Причем при зачистке измерительный резец не должен контактировать с забоем, а при измерительном резе с подготовленной выровненной поверхности толщина среза должна быть установлена с точностью не более ± 0,05 мм.

Второе основное требование к разрабатываемому устройству определения сопротивляемости резанию состоит в обеспечении измерения сопротивляемости резанию калийной соли под различными углами к напластованию и при надежном креплении устройства в забое.

Третьим основным требованием к разрабатываемому устройству являлась автоматическая обработка полученных данных без последующей обработки осциллограмм.

Кроме указанных требований, при разработке устройства учитывались также автономность питания, возможность применения в агрессивной шахтной среде калийного рудника, эргономичность и другие требования.

На рис. 3 приведен общий вид установки для определения сопротивляемости резанию калийной соли.

Устройство состоит из рамы 1, на которой закреплен редуктор привода 2, направляющие 3, на которых установлены траверса 4 и резцедержатель 5 с измерительным 6 и зачистным 7 резцами. На раме 1 установлены опоры 9 и саморезные винты для крепления портативного прибора к калийному пласту. У прибора имеется электронно-вычислительное устройство 10 с жидкокристаллическим дисплеем, на котором высвечивается значение сопротивляемости резанию калийной соли. В памяти устройства может храниться до ста значений сопротивляемости резанию калийной соли. Питание электронно-вычислительного устройства осуществляется от источника питания ±4,5 В. Потребляемый ток в режиме измерения 0,4 А, в режиме индикации – 0,9 А.

Для проверки работоспособности и эффективности работы разработанной конструкции прибора был изготовлен экспериментальный образец, который испытан в лабораторных условиях на стенде, описанном выше. На стенде при каждом опыте определяли вначале сопротивляемость резанию калийной соли резцом ДКС, а затем сопротивляемость резанию портативным прибором. Расхождение результатов сопротивляемости резанию калийной соли при определении этими двумя способами составляло 3…5 %.

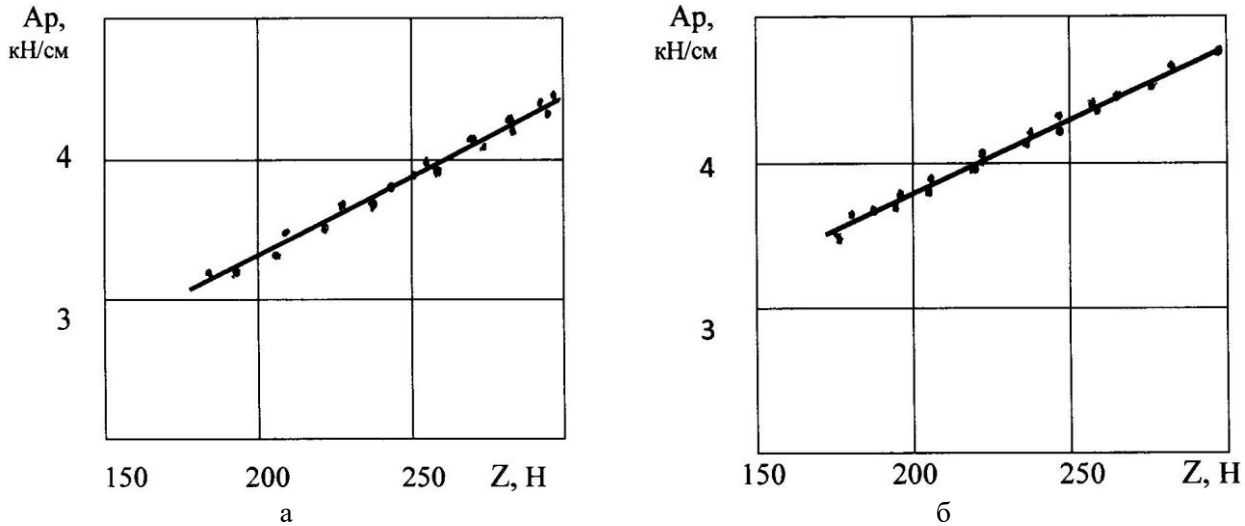


Рис. 2. Зависимость сопротивляемости резанию калийной соли от значений сил резания уменьшенным резцом с толщиной среза h_n=0,3 см: *а* – с $в_n$=0,2 см; *б* – с $в_n$=0,3 см

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

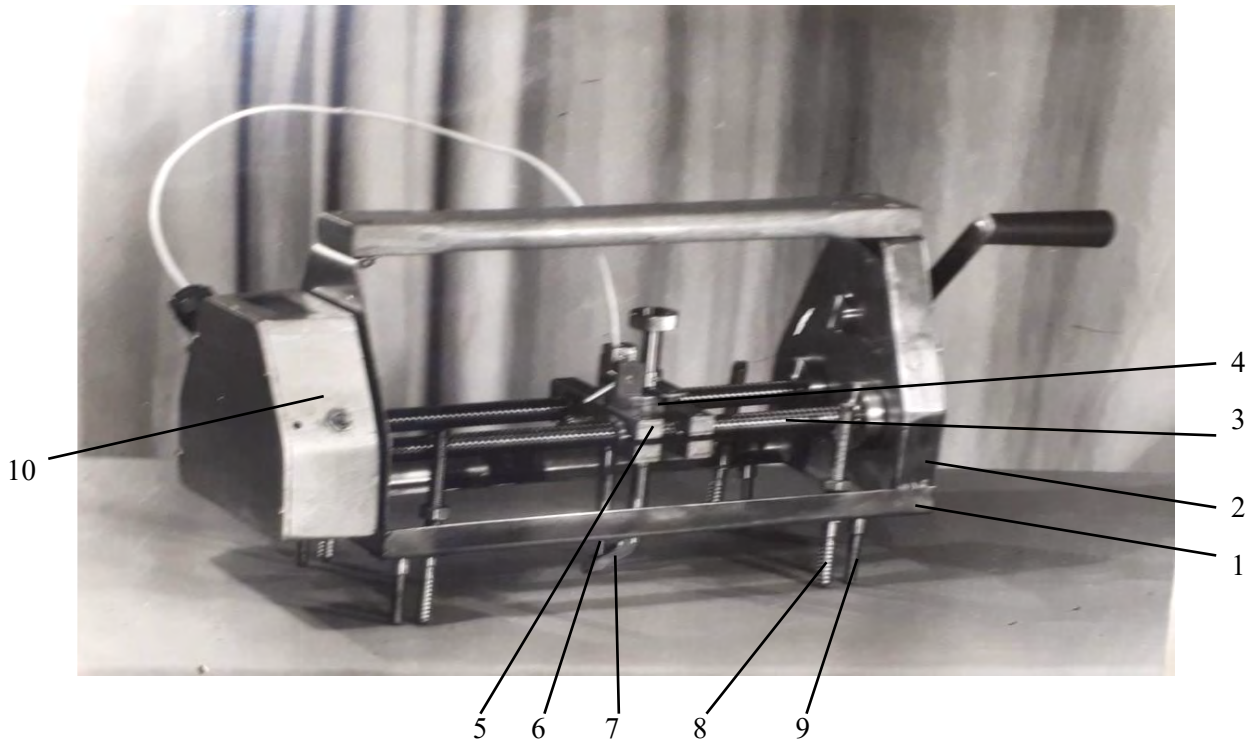


Рис. 3. Портативный прибор для определения сопротивляемости резанию калийной соли в шахтных условиях

После проведенных лабораторных исследований были проведены испытания портативного прибора в шахтных условиях на третьем руднике ПО «Белоруськалий», которые показали эффективность применения этого устройства.

Выводы

Из анализа способов и устройств по определению прочностных свойств горных пород, выполненного по литературным источникам и охранным документам развитых стран, установлено, что большинство существующих устройств очень громоздкие, требуют при замерах больших затрат времени и труда, либо дают низкие показатели по достоверности и точности результатов.

При разработке устройства для определения сопротивляемости резанию калийной соли в настоящей работе поставлена задача устранения недостатков, присущих существующим установкам, т.е. снижению трудоемкости проведения замеров за счет уменьшения габаритов и массы установок.

Для оценки степени необходимого уменьшения толщины и ширины среза портативного прибора проведены теоретические и экспериментальные исследования в лабораторных условиях на стенде с использованием блоков, вырезанных из массива пласта калийной соли.

Для разработки конструкции устройства для определения сопротивляемости резанию калийной соли сформулированы требования к портативному прибору, а затем для проверки эффективности работы разработанной конструкции был изготовлен экспериментальный образец, который исследован в лабораторных условиях на стенде. Результаты исследований показали высокую сходимость показателей сопротивляемости резанию установкой ДКС и разработанным прибором.

Испытания портативного прибора в шахтных условиях на третьем руднике ПО «Белоруськалий» показали эффективность применения этого устройства.

Список литературы

1. Пат. РФ МПК7: G01N3 E02D1. Устройство для определения прочности горных пород в массиве / Д.Н. Петров, А.Б. Максимов. – №2303251; опубл. 23.03.2013.
2. А.с. СССР, МКИ E21C 39/00. Прибор для определения сопротивляемости пород резанию в забое / В.А. Бренер [и др.] (СССР). – №2583373/22-03; заявл. 22.02.78; опубл. 14.03.81, Бюл. №10. – 2 с.
3. А.с. СССР, МКИ G01/L 1/04. Способ определения сил резания для любого режима резания / А.В. Шишкин [и др.] (СССР). – №2470066/24-02; заявл. 28.03.77; опубл. 30.05.81, Бюл. №14. – 4 с.
4. А.с. СССР, МКИ G01/L5/16. Устройство для измерения сил резания / В.Д. Купцов [и др.]

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

(СССР). – №2710156/20-05; заявл. 20.11.78; опубл. 15.06.81, Бюл. №22. – 4 с.
5. А.с. СССР, МКИ Е21С 39/00. Устройство для определения сопротивляемости пород резанию / Е.О. Решко [и др.] (СССР). – №2839782/20-05; заявл. 11.11.79; опубл. 23.07.81, Бюл. №42. – 4 с.
6. А.с. СССР, МКИ Е21-1С 39/00. Устройство для определения сопротивляемости пород резанию / А.Т. Затонских, Л.А. Затонских (СССР). – №28670444/22-03; заявл. 10.01.80; опубл. 23.09.81, Бюл. №35. – 4 с.
7. А.с. СССР, МКИ Е21С 39/00. Способ исследования сопротивляемости строительных материалов и горных пород резанию и устройство для его осуществления / В.Г. Долгих (СССР). – №2320657/ 22-03; заявл. 04.02.76; опубл. 23.10.81, Бюл. №39. – 6 с.
8. А.с. СССР, МКИ Е21С 39/00. Способ определения сопротивляемости калийной руды резанию / В.И. Ефремов [и др.] (СССР). – №3560746/22-03; заявл. 04.03.83; опубл. 15.05.85, Бюл. №14. – 3 с.
9. Берон, А.И. Резание угля. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 196 с.
10. Позин, Е.З. Сопротивляемость углей резанию режущими инструментами. – М.: Наука, 1972. – 238 с.
11. А.с. СССР, МКИ Е21С 39/00. Устройство для определения сопротивляемости горных пород резанию / Е.О. Решко [и др.] (СССР). – №2839782/20-05; заявл. 11.11.79; опубл. 23.07.81, Бюл. №42. – 4 с.
12. Разработка и изготовление макетного образца измерительного резца для определения сопротивляемости угля резанию: Отчет о НИР/ ИГД им. А.А. Скочинского; Е.З. Позин. – М., 1986. – 47 с.
13. А.с. СССР, МКИ Е21С 39/00. Прибор для определения сопротивляемости горных пород резанию / А.Т. Затонских, Л.А. Затонских (СССР). – №2267043/22-03; заявл. 10.01.80; опубл. 23.01.82, Бюл. №39. – 4 с.
14. Лейбов, В.М. Метод определения сопротивляемости углей разрушению / В.М. Лейбов, Е.З. Позин. – М.: Углетехиздат, 1957. – 24 с.
15. Приборы для прогноза выбросоопасных зон в угольных пластах. ПГ-2 МА, ЗГ-1 и ПК- 1. Техническое описание. – Ворошиловград, 1978. – 28 с.
16. Пугачев, Е.В. Инструментальное определение прочностных и деформационных свойств горных пород в натурных условиях / Е.В. Пугачев, В.А. Корнеев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 6(94). – С. 50-53.
17. Режимы работы комбайнов для добычи калийных руд / В.А. Бренер и др. – М.: Недра, 1984. – 286 с.
18. Пат. 4181360 США, МКИ Е21С 39/00. Cutting Force Sensor. Coal Industry (Великобритания). – №403219; заявл. 03.10.2010; опубл. 01.01.2011.
19. Пат. 4189183 США, МКИ Е21С 39/00. Mining machine with cutter drums and sensing apparatus / Gebs, Eickhoff (ФРГ). – №931644; заявл. 07.08.78; опубл. 19.02.80.
20. А.з. ФРГ МКИ G01/L 5/00. Mebshntide fur Eidbewegungsmachinen / Fried. Krupp Gmbh (ФРГ). – №3413612; заявл. 15.03.85; опубл. 18.09.86. – 20 с.
21. А.з. ФРГ, МКИ Е21С 25/36. Mebvorrichtvng fur die Meibtlandruck / Schnittkraft bergwerksvrband Gmbh (ФРГ). – №3321237; заявл. 11.04.84; опубл. 17.10 85. – 5 с.
22. А.з. 57-931 Япония, МКИ G01/L 5/00. Устройство для измерения силы резания / Тосиба Кикай К.К. (Япония). – №49-20663; заявл. 21.02.74; опубл. 08.01.82. – 8 с.
23. А.з. 57-29661 Япония, МКИ G01/L 5/00. Зажимной резец для измерения сопртивляемости резанию / Ниппон Токусю Тогё К.К. (Япония). – №50-72 315; заявл. 13.06.75; опубл. 24.06.82. – 5 с.
24. А.с. СССР, Е21С 27/32. Стенд для исследования исполнительных органов горных машин / Н.Г. Афендиков [и др.] (СССР). – №1273544; заявл. 21.06.85; опубл. 01.08.86, Бюл. №44. – 4 с.

N.G. Afendikov /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

PORTABLE DEVICE FOR DETERMINING THE STRENGTH PROPERTIES OF ROCKS

Background. *For a reasonable choice from the list of currently produced mining machines in relation to specific mining and geological conditions, as well as for a reasonable choice of rational parameters of the operating modes of the working bodies and their drives, both in the design and improvement of existing machines, it is necessary to know the strength characteristics of the destroyed rock formations.*

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

Materials and/or methods. *When developing a device for determining the potassium salt cutting resistance, in this paper, set the task of eliminating the shortcomings inherent in the DKC and SDM units, i.e. reducing the complexity of measurements by reducing the size and weight of the units. Theoretical and experimental studies carried out to assess the degree of the required reduction in the thickness and width of the cut by the cutter of the portable device. Set requirements for the design, engineered and manufactured the device for determining the resistance to cutting of the potassium salt.*
Results. *To check the performance and efficiency of the developed design of the device, an experimental sample made and tested in the laboratory on the stand and in the mine conditions.*
Conclusion. *Tests of the portable device in mine conditions at the third mine of "Beloruskaliy" showed high efficiency of application of this device.*

Keywords: *strength properties, rocks, measuring tools, recording, low labor intensity.*

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

Статья поступила 30.01.2019 г.
© Н.Г. Афендиков, 2019
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко



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

УДК 621.86

А.Я. Грудачев /к.т.н./, Т.П. Мищенко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ПОДДЕРЖИВАЮЩЕГО РОЛИКА В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Проведено исследование процесса нагрева при взаимодействии конвейерной ленты с роликоопорой в аварийном режиме. Уточнена и проанализирована математическая модель процесса нагрева при движении ленты по заклиненному ролику, установлены зависимости температуры его нагрева при изменении скорости движения ленты, усилия, действующего на ролик.

Ключевые слова: *аварийный режим, процесс, нагрев, лента, ролик, шахтный конвейер.*

Постановка проблемы

Развитие топливно-энергетического комплекса страны определяется развитием и функционированием угольной промышленности. Добыча угля производится подземным способом и зависит от состояния подземного транспорта. Наиболее эффективным средством перемещения грузов в шахтах является ленточный конвейер [1]. С введением в эксплуатацию большего количества конвейеров, соответственно, происходит увеличение количества аварийных ситуаций. Одним из основных источников возникновения пожароопасных ситуаций остаются шахтные конвейерные ленты [2]. Основной из главных причин пожаров является их воспламенение в результате трения ленты о барабан и элементы конструкции.

Движение ленты производится с участием вращающихся роликоопор, которые могут иметь неисправность в аварийной ситуации. Силы прижатия движущейся ленты к ролику может быть достаточно для возникновения между ними интенсивного трения с образованием большого количества тепла и повышением температуры в месте контакта до 300 °С и более [3]. Это чревато воспламенением ленты и может привести к аварийной ситуации. Поэтому вопросы, связанные с предотвращением пожаров на ленточных конвейерах, являются актуальными.

Анализ последних исследований и публикаций

В научных исследованиях по изучению аварийных ситуаций на шахтных ленточных конвейерах рассматриваются проблемы взрыво- и пожаробезопасности оборудования и элементов конвейера и пути их решения [4…7], а также приводятся результаты испытаний конструктивных элементов, в том числе и конвейерных лент [8…10]. Вопросами возникновения пожароопасных ситуаций на шахтных ленточных конвейерах, их причинами и последствиями, связанными с нагревом, возгоранием, занимались и занимаются в настоящее время многие ученые, исследователи и производственники [11…14]. Данная работа является продолжением указанных исследований.

Цель (задачи) исследования

Целью данного исследования является изучение процесса нагрева при движении конвейерной ленты по заклиненной поддерживающей роликоопоре.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи: уточнить математическую модель процесса нагрева движущейся по заклиненному ролику ленты; исследовать процесс нагрева движущейся ленты и заклиненного ролика методом теплового баланса; провести анализ процесса нагрева при движении конвейерной ленты по заклиненному ролику.

Основной материал исследования

Исследование процесса нагрева в аварийном режиме при движении ленты по заклиненной роликоопоре шахтного ленточного конвейера основано на составлении уравнения теплового баланса [14]. Процесс выделения теплоты представлен как динамический.

В данном аварийном режиме (рис. 1) тепло, образованное трением ленты о ролик, будет расходоваться на нагрев этих элементов, отводиться излучением, естественной конвекцией от неподвижного ролика, теплопроводностью от ролика к ленте и уноситься движущейся лентой.

На рис. 1 $\omega_р$ – угловая скорость ролика, 1/с, в данном режиме $\omega_р$=0; $V_л$ – скорость ленты, м/с, в данном режиме $V_л \neq 0$.

Уравнение теплового баланса для данного режима:

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

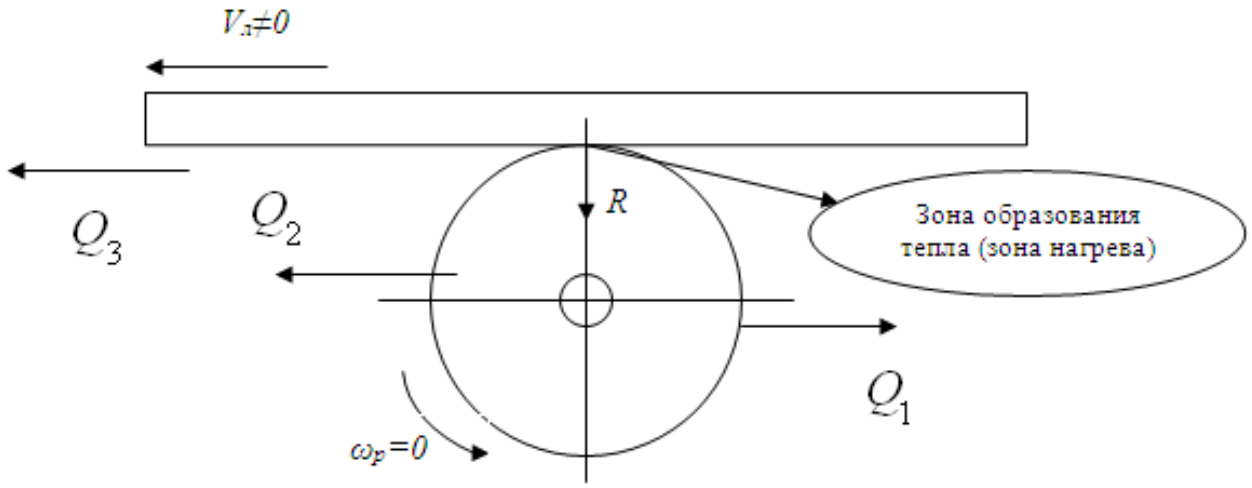


Рис. 1. Отвод тепла при режиме движения ленты по заклиненному ролику

$$Q_{обр} \cdot T = Q_{нр} + T(Q_1 + Q_2 + Q_3), \qquad Q_2 = \alpha_1 \cdot F_p (t_1 - t_0), \text{ Вт}, \quad (2)$$

где $Q_{обр}$ – количество тепла, образованное при работе конвейера в единицу времени, Вт; $Q_{нр}$ – количество тепла, расходуемое на нагрев ролика и ленты, Дж; Q_1 – количество тепла, отведенное излучением, Вт; Q_2 – количество тепла, отведенное естественной конвекцией, Вт; Q_3 – количество тепла, уносимое движущейся лентой, Вт.

Принятые допущения:

– температура в различных местах ролика, ленты и элементов конструкции одинакова;

– роликоопора не имеет защитного покрытия (футеровки);

– конвейерная лента представляет собой однородный материал с соответствующими характеристиками, т.е. не учитывается количество тепла, выделяющееся при прохождении теплового потока сквозь многослойное тело [15], коэффициенты теплопроводности каждого слоя которого отличаются [16,17].

Количество тепла, излучаемое в окружающую среду:

$$Q_1 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot F_p \left[\left(\frac{273 + t_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_0}{100} \right)^4 \right], \text{Вт}, \quad (1)$$

где F_p – площадь излучения, включающая в себя площади поверхностей участка ролика, не покрытого лентой, торцевых элементов ролика, м^2; C_0 – константа излучения абсолютно черного тела, Вт/(м^2·град.^{4}); ε – степень черноты ролика; t_1 – температура в зоне нагрева, град.; t_0 – температура окружающей среды, град.

Количество тепла, отводимое естественной конвекцией:

где α_1 – коэффициент теплоотдачи в условиях естественной конвекции, Вт/(м^2·град.); F_p – площадь поверхности ролика, не покрытого лентой, м^2.

Количество теплоты, уносимое движущейся лентой:

$$Q_3 = \alpha_2 \cdot F_л (t_1 - t_0), \text{ Вт}, \quad (3)$$

где $F_л$ – площадь участка ленты в зоне нагрева, м^2; α_2 – коэффициент теплоотдачи в условиях вынужденной конвекции, зависящий от скорости движения ленты, Вт/(м^2·град.).

$$\alpha_2 = \frac{Nu_f \cdot \lambda_f}{l_л} = \frac{c \cdot Re_f^n \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_v} \right) \cdot \lambda_f}{l_л} = \frac{c \cdot \left(\frac{V_f \cdot l_л}{\gamma_f} \right)^n \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_v} \right) \cdot \lambda_f}{l_л},$$

где Nu_f – критерий теплоотдачи (Нуссельта); Re_f – критерий динамического подобия (Рейнольдса); $Pr_f = \gamma/\alpha$ – критерий Прандтля, характеризующий физические свойства среды – воздуха; Pr_f/Pr_v – член выражения, учитывающий влияние теплового потока; α – коэффициент температуропроводности; $l_л$ – длина участка ленты в зоне нагрева, м; γ_f – кинематическая вязкость среды – воздуха, м^2/с; λ_f – теплопроводность среды – воздуха, Вт/(м·град.).

Так как лента с температурой окружающей среды t_0 находится в зоне нагрева довольно незначительное время, например, при $V_л$=2 м/с,

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

$F_л$=0,05 м^2 время пребывания ленты в зоне нагрева составит 0,025 с. Поэтому она практически не успевает нагреваться, и тогда $t_1=t_0$. Следовательно, $Q_3=0$.

Количество тепла, образующегося при взаимодействии ленты с заклиненным неподвижным роликом, в единицу времени:

$$Q_{обр} = R \cdot V_л \cdot k_T \text{, Дж/с,} \quad (4)$$

где $V_л$ – линейная скорость ленты, м/с; R – усилие груженой или порожней ветви ленты, действующее на ролик, Н; k_T – коэффициент, учитывающий трение между роликом и лентой, зависит от условий работы конвейера.

Количество тепла, расходуемое на нагрев ролика и ленты:

$$Q_{нр} = (c_р \cdot g_р + c_л \cdot g_л) \cdot (t_1 - t_0) \text{, Дж,} \quad (5)$$

где $c_р$ – теплоемкость материала ролика, Дж/(кг·град); $g_р$ – масса ролика, кг; $c_р$ – теплоемкость материала ленты, Дж/(кг·град.), величина различна для различных типов лент [16]; $g_р$ – масса ленты на участке касания с роликом, кг.

Количество тепла, отводимое за время T, будет равно: $(Q_1 + Q_2 + Q_3) \cdot T$.

Тогда уравнение теплового баланса примет вид:

$$Q_{обр} \cdot T = Q_{нр} + T \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3), \quad (6)$$

откуда:

$$T = \frac{Q_{нр}}{Q_{обр} - (Q_1 + Q_2 + Q_3)} \text{, с.} \quad (7)$$

Совокупность выражений (1)…(7) представляет собой математическую модель процесса нагрева заклиненного ролика при движении по нему конвейерной ленты в аварийном режиме.

Приведены расчеты по математической модели для следующих исходных данных [14,16,17]:

– площадь излучения, включающая в себя площади поверхностей ролика, не покрытого лентой, и его торцевых элементов, $F_р$=0,095 м^2;

– константа излучения абсолютно черного тела C_0=5,69 Вт/(м^2·град.^{4});

– степень черноты ролика ε=0,95;

– температура окружающей среды t_0=25 ºС;

– температура тления мелкодисперсных частиц t_1=97 ºС;

– коэффициент теплоотдачи в условиях естественной конвекции α_1=6 Вт/(м^2·К);

– коэффициент, учитывающий трение между роликом и лентой, зависит от условий работы конвейера k_T=1,2;

– скорость ленты $V_л$=2,15 м/с;

– усилие ленты, действующее на ролик, R=200 Н;

– лента ТА-300 с 6-ю прокладками массой 1 м^2 – 18,2 кг, соответственно, масса участка ленты в зоне нагрева $g_л$=0,728 кг;

– теплоемкость материала ленты $c_л$=0,971·10^3 Дж/(кг·град.);

– длина участка ленты в зоне нагрева $l_л$=0,05 м;

– площадь участка ленты в зоне нагрева $F_л$=0,04 м^2;

– ролик стальной Ст3 в эксплуатации с рабочим налетом;

– теплоемкость материала ролика $c_р$=0,557××10^3 Дж/(кг·град.);

– масса ролика $g_р$=8,3 кг.

Расчет согласно исходным данным.

Количество тепла, излучаемое в окружающую среду, Q_1=55,8 Вт.

Количество тепла, отводимое естественной конвекцией, Q_2=41,0 Вт.

Количество теплоты, уносимое движущейся лентой, Q_3=0 Вт.

Количество тепла, образующегося при взаимодействии ленты с заклиненным роликом в единицу времени, $Q_{обр}$=516 Вт.

Количество тепла, расходуемое на нагрев ролика и ленты, $Q_{нр}$=384000 Дж.

Время нагрева ленты конвейера в аварийном режиме T=916 с.

Результаты исследований приведены в табл. 1 и 2, рис. 2. Прочерки в ячейках таблицы означают, что при данных условиях количество тепла, отдаваемое в окружающую среду излучением естественной и вынужденной конвекцией, идущее на нагрев элементов конструкции, больше или равно образовавшемуся количеству тепла в аварийном режиме, т.е.:

$$Q_{обр} \cdot T \le Q_{нр} + T \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3) .$$

Табл. 1. Значения времени нагрева ролика конвейера при изменении скорости ленты

t_1, ºС	Время T, мин, нагрева до температуры t_1, ºС при R=200 Н				
	V=1,6 м/с	V=2,0 м/с	V=2,15 м/с	V=2,5 м/с	V=3,15 м/с
90	1160	879	805	674	517
97	1340	1000	915	763	582
185	7950	4190	3560	2640	1780
255	-	-	4660	4110	4600

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

Табл. 2. Значения времени нагрева ролика конвейера при изменении усилия ленты, действующего на ролик

t_1, ºС	Время T, мин, нагрева до температуры t_1, ºС при $V_л$=2,15 м/с						
	R=100 Н	R=200 Н	R=300 Н	R=450 Н	R=600 Н	R=750 Н	R=1000 Н
90	2010	805	503	322	237	187	139
97	2380	916	567	360	264	209	155
185	-	3560	1720	964	671	514	370
255	-	4660	4310	1830	1160	848	586

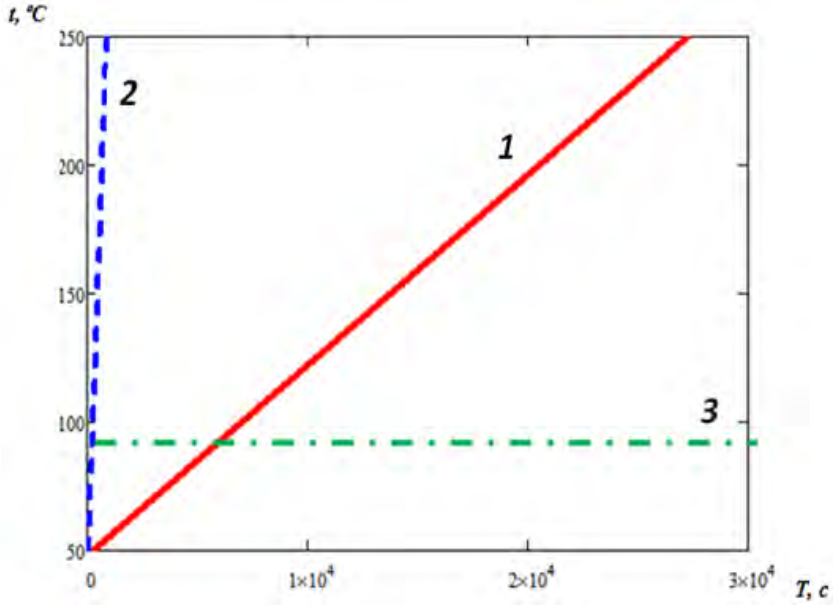


Рис. 2. Процесс нагрева ролика и ленты конвейера при изменении скорости движения ленты и усилия, действующего на ролик:
1 – при $V_л$=2,15 м/с, R=200 Н; *2* – при $V_л$=2,5 м/с, R=600 Н;
3 – t=97 °С – температура тления мелкодисперсных частиц ленты

Из результатов исследований, приведенных в табл. 1 и 2, рис. 2, следует:

– достижение температуры тления мелкодисперсных частиц на ленте происходит при $V_л$=2,15 м/с; R=200 Н и $V_л$=2,5 м/с; R=600 Н;

– дальнейшее увеличение времени движения конвейерной ленты по заклиненному ролику приводит к росту температуры;

– при увеличении скорости движения ленты время достижения температуры тления мелкодисперсных частиц уменьшается;

– при нагружении ленты грузом увеличивается усилие, действующее на ролик, соответственно, уменьшается время достижения температуры тления мелкодисперсных частиц на ленте.

Таким образом, при увеличении скорости движения ленты и при высоких усилиях ленты, возникающих при транспортировке грузов с большой массой по ней и действующих на ролик, на участке контакта ролика и ленты выделяется больше тепла, чем отдается в окружающую среду.

Выводы

Основным результатом проведенного исследования является уточненная математическая модель процесса нагрева ролика при движении конвейерной ленты по заклиненной поддерживающей роликоопоре. На основании проведенных исследований были установлены зависимости времени нагрева в зоне контакта ленты с роликом в аварийном режиме. Это позволило определить временные параметры достижения определенных значений температур при заданных исходных данных, например, для ленты резинотканевой типа ТА-300 с 6-ю прокладками при скорости ленты V=2,15 м/с и усилии, действующем на ролик, R=300 Н, до температуры тления мелкодисперсных частиц 97 ºС достигается за время T=567 с.

Установленная взаимосвязь параметров конвейерной ленты и ролика роликоопоры, при достижении конкретных температур воспламенения, позволяет обоснованно находить оптимальные параметры для нормальной работы шахтного ленточного конвейера и предотвращать ава-

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

рийные ситуации, возникающие во время его эксплуатации.

В дальнейшем планируется исследование процесса нагрева ролика и конвейерной ленты при аварийной остановке роликоопоры с уточнением параметров дополнительных средств защиты роликов и конструкции ее как многослойного материала, в том числе, для трудногорючих лент.

Список литературы

1. Шахтный транспорт / В.А. Будишевский [и др.]. – изд. 2-е, перераб. и доп. – Донецк: ГОУВПО «ДонНТУ», 2017. – 400 с.
2. Теоретические основы и расчеты транспорта энергоемких производств: Учебное пособие для вузов / В.А. Будишевский [и др.]; под общ. ред. проф., д.т.н. В.П. Кондрахина. – изд. 2-е, перераб. и доп. – Донецк: ГОУВПО «ДонНТУ», 2017. – 216 с.
3. Левкин, Н.Б. Предотвращение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины / Донецк: Донбасс, 2002. – 392 с.
4. Ткачук, С.П. Взрывопожаробезопасность горного оборудования / С.П. Ткачук, В.П. Колосюк, С.А. Ихно. – К.: Основа, 2000. – 590 с.
5. Ющенко, Ю.Н. Предупреждение пожароопасного нагревания приводного барабана ленточного конвейера / Ю.Н. Ющенко, А.Н. Прима, И.Ф. Дикенштейн // Горноспасательное дело. – 2011. – Вып.48. – С. 106-114.
6. Manojkumar, H. Fire Risk Prevention and Control Measures in Belt Conveyor / H. Manojkumar, R. ShiyamPresanna // International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR). – 2014. – Iss.4. – Vol.3. – P. 1084-1087.
7. Kennedy, J., Kennedy, P.M. Fires and Explosions, Determining Cause and Origin. – Investigations Institute, Chicago, IL, 1985. – 451 p.
8. Определение пожарооопасности материала шахтных конвейерных лент / Л.С. Беляева [и др.] // Уголь Украины. – 2000. – №1. – С. 37-39.
9. Отчет МакНИИ №1 «Сравнительные испытания трудновоспламеняемых резинотканевых конвейерных лент». – Макеевка: Донбасс, 1969. – 311 с.
10. Отчет МакНИИ №2 «Сравнительные испытания трудновоспламеняемых резинотканевых конвейерных лент». – Макеевка: Донбасс, 1969. – 307 с.
11. Пути увеличения срока службы быстроизнашиваемых поверхностей и конвейерных лент / А.Я. Грудачев [и др.] // Уголь Украины. – 2001. – №4. – С. 33-36.
12. Теплопроводность конвейерных лент и выбор длительности вулканизации при их стыковке / Н.Я. Биличенко [и др.] // Горный журнал. – 1975. – №2. – С. 79-84.
13. Kara, A. Improvements in conveyor belt fire suppression systems for U.S. coal mines. – Pittsburgh, PA, USA: Teacoach, NIOSH, 2010. – P. 1-6.
14. Verakis, H. Reducing the Fire Hazard of Mine Conveyor Belts. Proceedings of 5th Mine Ventilation Symposium. Chapter 11, June 3-5, 1991. West Virginia University, Morgantown, WV, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, 1991. – P. 69-73.
15. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. Учебное пособие для неэнергетических специальностей; под ред. проф. В.С. Силецкого. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1975. – 496 с.
16. Мищенко, Т.П. Анализ процесса нагрева трудногорючей ленты как композитного материала в аварийном режиме при полной ее пробуксовке на концевом барабане / Сборник материалов IX Всерос. научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая», 18-21 апр. 2017 г., Кемерово. – Кемерово: ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева, 2017. – 5 с.
17. Казанцев, Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. – М.: Металлургия, 1975. – 118 с.
18. Захарченко, П.И. Справочник резинщика. – М.: Машиностроение, 1983. – 220 с.

A.Ya. Grudachev /Cand. Sci. (Eng.)/, T.P. Mishchenko
Donetsk National Technical University (Donetsk)

STUDY OF THE SUPPORT ROLLER HEATING PROCESS IN AN EMERGENCY MODE OF BELT CONVEYOR OPERATION

Background. *The mine conveyor belts are among the main sources of fire hazards. The belt movement participated with rotating of roller supports, which may have malfunctions that are fraught with the ignition of the belt and can lead to an emergency. Therefore, issues related to the prevention of fires on belt conveyors are relevant.*

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

Materials and/or methods. *The objective of this paper is to study the heating process when the conveyor belt moves along the jammed support roller. To achieve this goal, the following tasks solved: the mathematical model of the heating process of the belt moving along the jammed roller refined; the process of heating the moving belt and the jammed roller by the heat balance method studied; the heating process analyzed when the conveyor belt moves along the jammed roller.*

Results. *The main result of the study is a refined mathematical model of the roller heating process during the movement of the conveyor belt on the jammed support roller. On the basis of the conducted studies, dependences of time of heating in a zone of contact of a belt with a roller in an emergency mode established. This made it possible to determine the time parameters for reaching certain temperature values at a given initial data, for example, for a rubber-fabric belt type TA-300 with 6 gaskets at a belt speed V=2.15 m/s and the force acting on the roller R=300 N to a melting temperature of fine particles of 97 °C achieved during the time T=567 s.*

Conclusion. *The established interrelation between the parameters of the conveyor belt and the roller of the roller support when reaching specific ignition temperatures makes it possible to reasonably find the optimal parameters for the normal operation of the mine belt conveyor and to prevent emergencies during its operation.*

Keywords: *emergency mode, process, heating, belt, roller, mine conveyor.*

Сведения об авторах

А.Я. Грудачев
SPIN-код: 2799-3774
Author ID: 849266
Телефон: +380 (71) 361-71-06
Эл. почта: grudachev.a@yandex.ru

Т.П. Мищенко
SPIN-код: 5668-8687
Author ID: 998107
Телефон: +380 (71) 334-90-10
Эл. почта: Mtpgztl2015@yandex.ru

Статья поступила 30.01.2019 г.
© А.Я. Грудачев, Т.П. Мищенко, 2019
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин



УДК 622.233.05

О.Ф. Ларионов
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ШАРОШЕЧНЫМИ ДОЛОТАМИ БУРОВЫХ СТАНКОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ КАРАКУБСКОГО И РОДНИКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ ФЛЮСОВЫХ ИЗВЕСТНЯКОВ

Проанализированы особенности геологического строения Каракубского и Родниковского месторождений флюсовых известняков и разработана модель взаимодействия шарошечного бурового инструмента с горными породами в забое скважины для проведения взрывных работ применительно к условиям Каракубского и Родниковского месторождений флюсовых известняков, определены осевые усилия на буровом инструменте и скорости бурения в сравнении с практическими данными, полученными при бурении взрывных скважин буровыми станками типа СБШ-250МНА-32 для пород различной крепости.

Ключевые слова: *буровой станок, шарошечное долото, осевое усилие, скорость бурения*.

Постановка проблемы

Бурение взрывных скважин в условиях Каракубского месторождения проводится по горным породам, которые в пределах одного горизонта имеют различную крепость, изменяющуюся от 3 до 11 единиц по шкале профессора М.М. Протодьяконова. Буримые породы также имеют различную зернистость, абразивность, трещиноватость и включают прослойки темно-серых глинистых сланцев, кварцевого песчаника и другие включения. Бурение скважин осуществляется шарошечным буровым инструментом, который при таком соотношении пород с различными свойствами испытывает чрезвычайно изменяющиеся динамические нагрузки на границах перехода пород с различными свойствами, особенно с карстовыми полостями. Также происходит повышенный абразивный износ элементов долота. Поэтому разработка рациональных режимов бурения в данных условиях позволит увеличить производительность буровых станков и предупредит повышенный износ бурового инструмента, что улучшит технико-экономические показатели бурения в целом.

Анализ последних исследований и публикаций

Основным оборудованием для бурения взрывных скважин на карьерах являются станки шарошечного бурения [1]. Слабым звеном в станках являются проблемы разрушения и низкого ресурса рабочего инструмента, а также нагрузки, действующие на него при бурении технологических скважин [2]. Из опыта работы известно, что на износ элементов вооружения шарошечных долот влияют механические свойства осадочных горных пород, режимы бурения и механизмы разрушения горных пород [3]. На данный момент разработаны требования к конструкции и оснащению буровых станков, требования к условиям, методы и средства их испытаний, различные типомодели шарошечных долот отечественного и зарубежного производства, эксплуатируемые на карьерах РФ и СНГ [4,6]. Для изучения проблемы износа бурового инструмента разработана упрощенная модель процесса разрушения породы при перекатывании шарошки и контактах зубьев с поверхностью забоя для определения осевого усилия на забой и теоретической скорости бурения [5]. На основании анализа процесса бурения с помощью математического моделирования проводятся расчеты параметров для различных условий и определяются направления дальнейших исследований для создания реальных возможностей рационального регулирования режимов, приводящих к повышению производительности буровых станков, с использованием методов определения механических свойств горных пород [7,8]. Механизмы разрушения пород при бурении зависят от типов породоразрушающих инструментов, интенсивности и скорости их нагружения в этом процессе, характеристик буровых растворов для очистки забоя скважины. Конструктивные особенности долот, требования к структуре вставных зубьев разрабатываются для конкретных условий применения с учетом закономерностей разрушения пород, их неоднородности и структур-

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

ных особенностей. Учитывая многообразие существующих способов бурения и физико-механических свойств горных пород, изготавливаются буровые породоразрушающие инструменты с различными типами действия и конструктивного исполнения. Рациональное использование бурового инструмента определяется выполнением требований правил эксплуатации и учетом его отработки [9…11].

Цель (задачи) исследования

Целью данной исследовательской работы является изучение процесса взаимодействия шарошечного бурового инструмента с горными породами в забое при бурении взрывных скважин по породам с изменяемой величиной крепости и абразивности по глубине скважины для создания модели, позволяющей определять оптимальные режимные параметры бурения для условий Каракубского и Родниковского месторождений флюсовых известняков.

Основной материал исследования

Разведка и добыча полезных ископаемых в современном мире становится все более интенсивной. Буровые работы проводят не только в горной отрасли, но и в нефтегазовой и строительной отраслях. Годовые объемы бурения на открытых горных, строительных и земляных работах в России в ближайшее десятилетие превысят 60…70 млн. м, освоение потребует списочного состава буровых станков более 2 тыс. ед. и годового расходования 160…200 тыс. бурового инструмента. Ежегодные эксплуатационные затраты могут достигнуть более 6 млрд. руб., из которых примерно 60…65 % составят буровые долота [1]. Учитывая, что объемы горных работ наращиваются, а горно-геологические условия усложняются и не являются однотипными даже в пределах одного месторождения, актуальность проводимых работ возрастает. В настоящее время в мире насчитывается около 5000 действующих наземных буровых установок для разведки и разработки месторождений нефти и газа [2]. Каракубское месторождение флюсовых известняков разрабатывается открытым способом, на данный момент двумя карьерами: Северным и Жеголевским Комсомольского рудоуправления. Проведена детальная разведка Родниковского месторождения, которое в перспективе должно разрабатываться Комсомольским рудоуправлением. Объектом эксплуатации являются осадочные породы, которые представлены отложениями верхнего девона и мощной толщей нижнекарбоновых пород, включающих кондиционные горизонты флюсовых известняков. Каракубское месторождение включает также запасы полиметаллических руд и минералов серебра. Коэффициент крепости разрабатываемых пород по шкале проф. М.М. Протодьяконова составляет f=3…11. Рыхление скальных горных пород производится буровзрывным способом с применением буровых станков типа СБШ-250-МНА32, конструкция, оснащение и требования, по испытанию которых изложены в [4]. Известняки рассматриваемых месторождений относятся к труднобуримым породам. Горно-геологические условия Каракубского и Родниковского месторождений осложняются наличием карстовых полостей, которые заполнены глинами, разнозернистыми песками с примесью кремния, кремнистого мергеля и известняков. Встречаются каверны полые и заполненные песчано-глинистым материалом или кальцитом в виде крупных кристаллов. Классификация пород Каракубского месторождения представлена в табл. 1.

Высота уступа на горизонтах составляет 10 м. Глубина буримых взрывных скважин с учетом перебура в среднем составляет 12 м. Геологическое строение карьерного поля представлено на рис. 1.

Как видно из рисунка, в пределах горизонтов +3 м, -17 м, -47 м, -77 м соотношение пластов с породами различной крепости изменяется, и скважины приходится бурить шарошечным долотом одного типа, изменяя при этом режимы бурения: осевое усилие на долото и скорость вращения. Так, на горизонте +3 м первые четыре метра бурение проводится по мелкозернистым известнякам с крепостью f=6, а остальные 8 метров скважина бурится по серым сливным известнякам с крепостью f=10. Причем изменяется не только крепость пород, но и абразивность. На горизонте -17м первые три метра скважины бурение осуществляется по серым сливным известнякам с крепостью f=10, а остальная часть скважины бурится по серым и темно-серым средне- и мелкозернистым битуминозным известнякам с неравномерной величиной зерен, трещиноватостью. Очевидно, что бурение будет производиться одним долотом, но режимы бурения должны быть подобраны соответствующим образом, чтобы сохранить максимально возможную производительность и уменьшить износ долота. Имеющиеся факторы усложняют выбор оптимальных режимов бурения и увеличивают износ бурового инструмента. Месторождение вскрыто до горизонта -27 м, и в перспективе работы будут продолжаться с углублением до горизонта -87 м. На горизонте -47 м ожидается сочетание серых и темно-серых средне- и мелкозернистых битуминозных известняков

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

Табл. 1. Классификация пород Каракубского месторождения

Стратиграфический индекс	Характеристика пород	Тип пород
Нижнекаменноугольные отложения		
C^{v}_{d}	мощность m=50…60 м, крепость f=10…11	толстослоистые серые, темно-серые, средне- и мелкозернистые окремленные известняки с частыми желваками черных кремней
$C^{v}_{в+с}$	мощность m=50…60 м, крепость f=9…10	серые среднезернистые и мелкозернистые известняки
C^{v}_{a}	мощность m=6 м, крепость f=5…7	темно-серые до черного цвета тонкозернистые, часто глинистые, неплотные битуминозные известняки, переслаивающиеся с тонкими прослоями мощностью 0,05…0,4 м
Турнейский ярус		
C^{t1}_{d2}	мощность m=8 м, крепость f=6	темно-серые до черного цвета мелкозернистые битуминозные известняки с обилием фауны
C^{t1}_{d1}	мощность m=19 м, крепость f=10	серые сливные известняки
C^{t1}_{c}	мощность m=28…30 м, крепость f=7…8	серые и темно-серые средне- и мелкозернистые битуминозные известняки с неравномерной величиной зерен, трещиноватостью
C^{t1}_{b}	мощность m=31 м, крепость f=10	сливные и полусливные серые, синевато-серые трещиноватые известняки с тонкими прослоями доломитизированных мелкозернистых и среднезернистых известняков; часто встречаются прослои темно-серых глинистых сланцев мощностью до 2 м
C^{t1}_{d}	мощность m=3 м, крепость f=3	мелкозернистые глинистые известняки серого и темно-серого цвета, прослойки глинистого сланца и кварцевого песчаника на известковом цементе

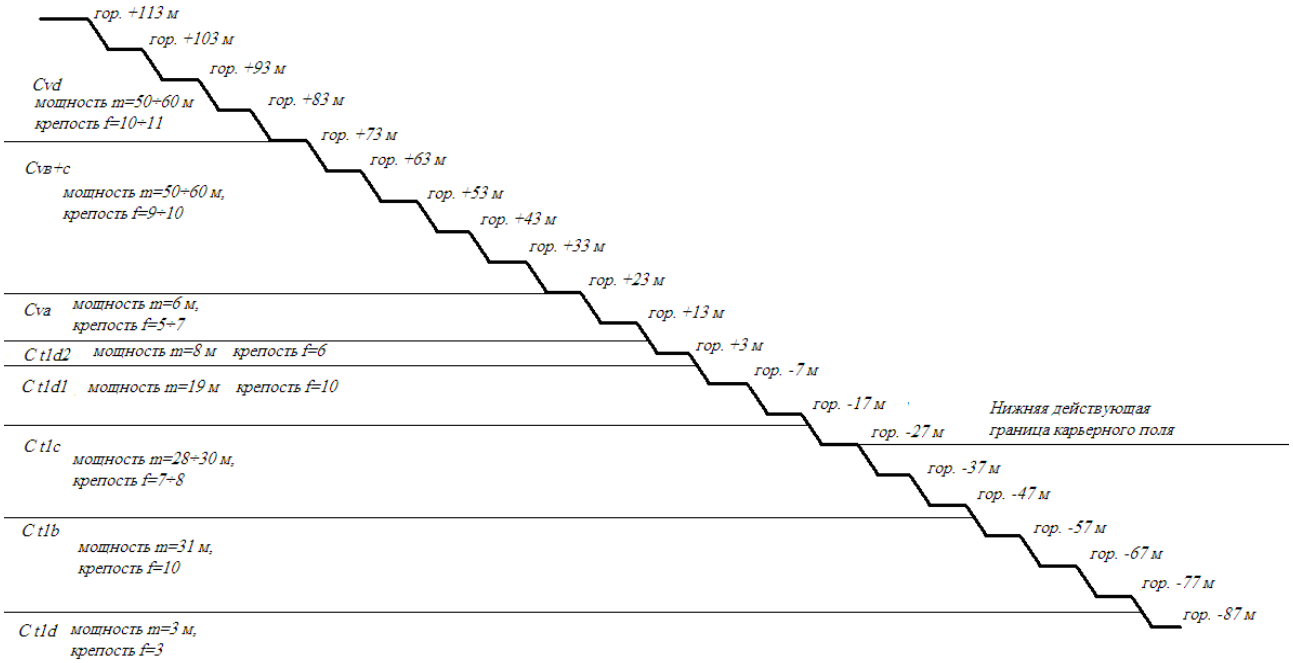


Рис. 1. Геологическое строение карьерного поля Каракубского месторождения

с неравномерной величиной зерен, трещиноватостью, крепостью f=7 и мощностью 3 м от верхней рабочей площадки с переходом в сливные и полусливные серые, синевато-серые трещиноватые известняки с тонкими прослойками доломитизированных мелкозернистых и среднезернистых известняков с прослойками темно-серых глинистых сланцев мощностью до 2 м и

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

крепостью f=10. В результате многолетней практики бурения взрывных скважин на предприятии «Комсомольское рудоуправление» по среднестатистическим данным хронометража были определены скорости бурения для пластов горных пород различной крепости шарошечным долотом типа III-244,5-ТЗ-П ГОСТ 20692-75.

Осевое усилие на буровой инструмент определялось по показаниям манометра в гидравлической системе механизма подачи станка.

Частота вращения бурового става составляла n=100 об/мин. Показатели сведены в табл. 2.

Для определения режимов работы бурового станка при бурении по породам различной крепости используют модели взаимодействия бурового инструмента с горной породой. Это определяет целесообразность дальнейшего проведения исследований для получения необходимых данных.

Упрощенная модель процесса разрушения породы при перекатывании шарошки и контактах зубьев с поверхностью забоя, предложенная проф. Р.Ю. Подэрни, определяет потребное осевое усилие подачи на долото с учетом крепости породы и диаметра долота и теоретическую скорость шарошечного бурения [5].

Осевое усилие подачи:

$$P_{oc} = 10^{-2} KfD, \qquad (1)$$

где K=6…8 – большие значения для более крупных долот; f – коэффициент крепости породы по М.М. Протодьяконову; D – наружный диаметр долота, мм.

Применив данную методику для расчета осевого усилия на буровой инструмент и скорости шарошечного бурения для реальных условий бурения известняков Каракубского месторождения, получим результаты, которые сравним с данными, полученными на практике, и сведем их в табл. 3.

Расчетное осевое усилие принималось равным значению, устанавливаемому при бурении скважин на станках. Расчетная скорость бурения определялась из условия частоты вращения бурового става, равной 100 об/мин.

Очевидно, что расчетные скорости бурения превышают значения, полученные на практике.

Для определения скорости бурения в данной методике используется глубина внедрения зуба шарошки в горную породу.

В оригинальной методике автор предлагает использовать коэффициент затупления в виде фиксированной величины, но в процессе работы величина затупления зубьев долота возрастает.

Поэтому предлагается для более точного отражения процесса взаимодействия инструмента с горной породой учесть проходку долота, абразивность горной породы и твердость материала, из которого изготавливают зубья фрезерованных долот и вставки штыревых долот, при определении глубины внедрения зуба в породу, вместо коэффициента затупления:

$$h = \frac{1{,}5 \cdot 10^2 \cdot P_{oc}}{\left(\frac{2A}{HRA}\right)^{\frac{A}{HRA}} \cdot D \cdot f\left(\frac{tg\alpha}{2+\mu_1}\right) \cdot \sqrt{\ln l}}, \qquad (2)$$

Табл. 2. Полученные данные скоростей бурения для горных пород Каракубского месторождения

Место проведения работ	Крепость по шкале профессора Протодьяконова	Скорость бурения, м/час	Осевое усилие, кН
Карьер Северный, горизонт -27 м	10…11	11	220
Карьер Жеголевский, горизонт +23 м	7…8	14	220

Табл. 3. Сравнительные данные осевых усилий на буровой инструмент и скоростей шарошечного бурения скважины

Этап бурения	Крепость по шкале профессора Протодьяконова	Скорость бурения по данным хронометража, м/час	Осевое усилие подачи станка, кН	Расчетная скорость бурения, м/час	Расчетное осевое усилие подачи, кН
Карьер Северный, горизонт -27 м	11	11	220	37,8	220
Карьер Жеголевский, горизонт +23 м	7…8	14	220	52,4	220

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

где h – глубина внедрения зуба шарошки, мм; μ – коэффициент трения металла шарошки о породу, μ=0,25…1,0; f – коэффициент крепости породы по М.М. Протодьяконову; D – наружный диаметр долота, мм; α – угол у вершины зуба, град.; l – проходка долота, м; A – показатель абразивности горной породы, мг [11]; HRA – твердость материала зуба (вставки) по Роквеллу.

Тогда теоретическая скорость шарошечного бурения будет определяться формулой:

$$\upsilon_б = \frac{16{,}2 \cdot K_{ск} \cdot n_{вр} \cdot P_{ос}}{\left(\frac{2A}{HRA}\right)^{\frac{A}{HRA}} \cdot D \cdot f\left(\frac{tg\alpha}{2+\mu_1}\right) \cdot \sqrt{\ln l}}, \quad (3)$$

где $K_{ск}$ – коэффициент, учитывающий уменьшение скорости бурения за счет неполного скола породы между зубьями ($K_{ск}$=0,3…0,5 – большая величина для более мягких пород); n – частота вращения бурового инструмента, $с^{-1}$.

Произведем расчеты скорости бурения по предлагаемой методике для горизонта +23 м карьера Жеголевского и для горизонта -27 м карьера Северного Каракубского месторождения для следующих условий:

– карьер Жеголевский, горизонт +23 м, осевое усилие $P_{ос}$=220 кН, крепость пород f=8, частота вращения n=40/100/120 об/мин, показатель абразивности A=18 мг;

– карьер Северный, горизонт -27 м, осевое усилие $P_{ос}$=220 кН, крепость пород f=11, частота вращения n=40/100/120 об/мин, показатель абразивности A=30 мг;

Для бурения применяется штыревое долото со вставками из сплава ВК11ВК с твердостью HRA=87. На практике при бурении по известнякам карьера Жеголевского проходка долота может составлять до 2000 метров. На карьере Северном известняки с высоким содержанием кремния и высокой твердостью и абразивностью, и максимальная проходка долота может составлять 1500 метров. Это зависит и от качества изготовления долот. Данные расчетов сведем в табл. 4.

Полученные значения соответствуют данным хронометража и отражают снижение скорости бурения при увеличении проходки долота и абразивности горных пород.

Графически эти зависимости отражены на рис. 2 и 3.

Используя полученную методику, можно, задавшись скоростью бурения, определить значения осевого усилия и скорости вращения бурового става при изменяющихся значениях крепости и абразивности пород.

Определим осевое усилие и частоту вращения бурового става при заданной скорости бурения $\upsilon_б$=12 м/час, крепости пород f=6, показатели абразивности A=18 мг, проходке долота l=300 м, что соответствует породам горизонта +13 м Жеголевского карьера:

$$P_{OC} = \upsilon_б \cdot \left(\frac{2A}{HRA}\right)^{\frac{A}{HRA}} \cdot D \cdot f\left(\frac{tg\alpha}{2+\mu_1}\right) \times \times \sqrt{\ln l} \cdot \left(16{,}2 \cdot K_{ск} \cdot n_{вр}\right)^{-1}. \quad (4)$$

Табл. 4. Расчетные значения скорости бурения для горизонта -27 м Северного карьера и +23 м Жеголевского карьера Каракубского месторождения

Проходка долота l, м	Показатель проходки долот $\sqrt{\ln l}$	Скорость бурения $\upsilon_б$, м/час					
		при осевом усилии $P_{ос}$=220 кН крепость пород f=8			при осевом усилии $P_{ос}$=220 кН крепость пород f=11		
		Частота вращения долота, об/мин			Частота вращения долота, об/мин		
		40	100	120	40	100	120
200	2,3	6,28	15,7	18,8	4,56	11,4	13,7
400	2,44	5,92	14,8	17,7	4,28	10,7	12,8
600	2,52	5,73	14,3	17,2	4,16	10,4	12,5
800	2,58	5,6	14	16,8	4,08	10,2	12,2
1000	2,62	5,5	13,7	16,5	4,0	10,0	12,0
1200	2,66	5,4	13,5	16,2	3,9	9,8	11,8
1400	2,69	5,3	13,2	15,9	3,8	9,7	11,6
1600	2,71	5,3	13,2	15,9	3,8	9,6	11,5
1800	2,73	5,2	13	15,6	3,8	9,6	11,5
2000	2,76	5,2	13	15,6	3,8	9,5	11,5

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

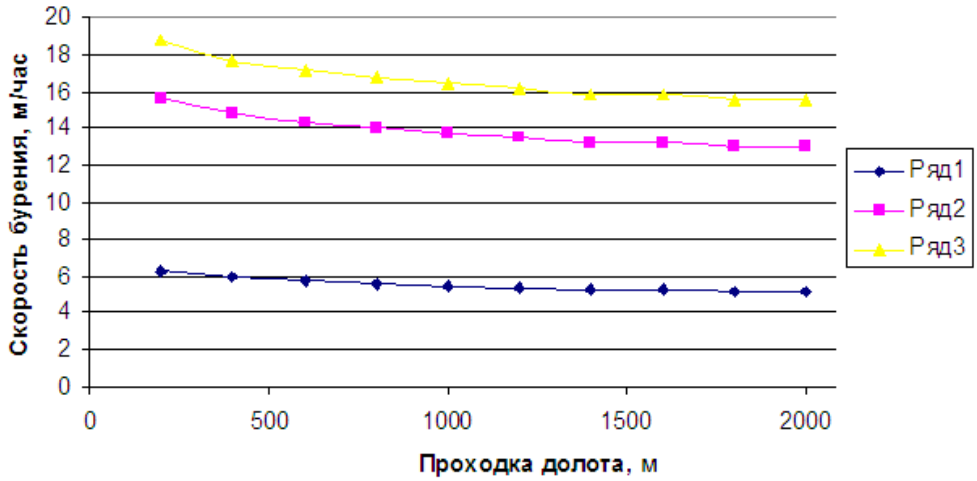


Рис. 2. Зависимость скорости бурения от проходки долота, частоты вращения бурового става при крепости буримых пород f=8:
ряд 1 – частота вращения n=40 об/мин; *ряд 2* – частота вращения n=100 об/мин;
ряд 3 – частота вращения n=120 об/мин

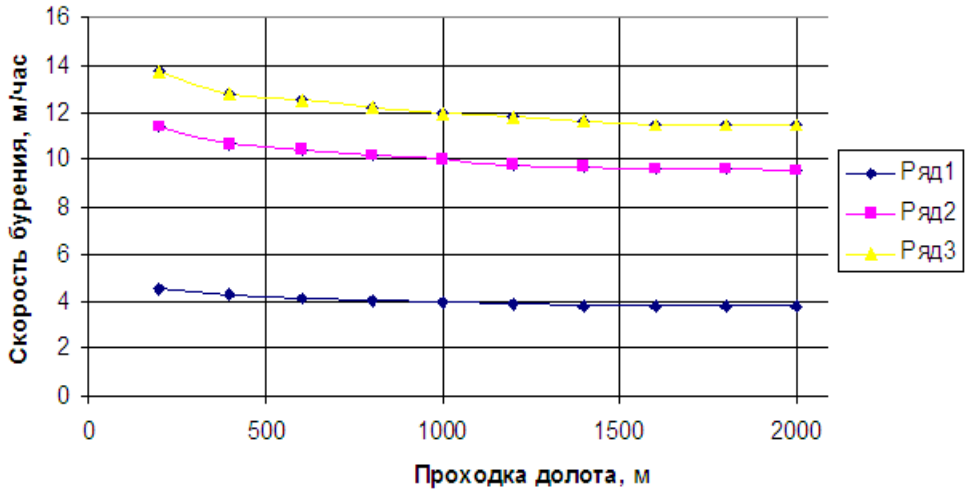


Рис. 3. Зависимость скорости бурения от проходки долота, частоты вращения бурового става при крепости буримых пород f=11:
ряд 1 – частота вращения n=40 об/мин; *ряд 2* – частота вращения n=100 об/мин;
ряд 3 – частота вращения n=120 об/мин

Данные расчетов сведем в табл. 5.

Определим осевое усилие и частоту вращения бурового става при заданной скорости бурения $\upsilon_б$=12 м/час, крепости пород f=10, показателе абразивности A=30 мг, проходке долота l=300 м, что соответствует породам горизонта -17 м Северного карьера. Данные расчетов сведем в табл. 6.

Табл. 5. Расчетные данные параметров бурения для горизонта +13 м

$\upsilon_б$=12 м/час, f=6, A=18 мг, l=300 м	
$P_{ос}$, кН	$n_{вр}$, об/мин
924	20
462	40
308	60
231	80
185	100
154	120
123	150

Табл. 6. Расчетные данные параметров бурения для горизонта -17 м

$\upsilon_б$=12 м/час, f=10, A=30 мг, l=300 м	
$P_{ос}$, кН	$n_{вр}$, об/мин
1195	20
597,5	40
398	60
298	80
239	100
199	120
159	150

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

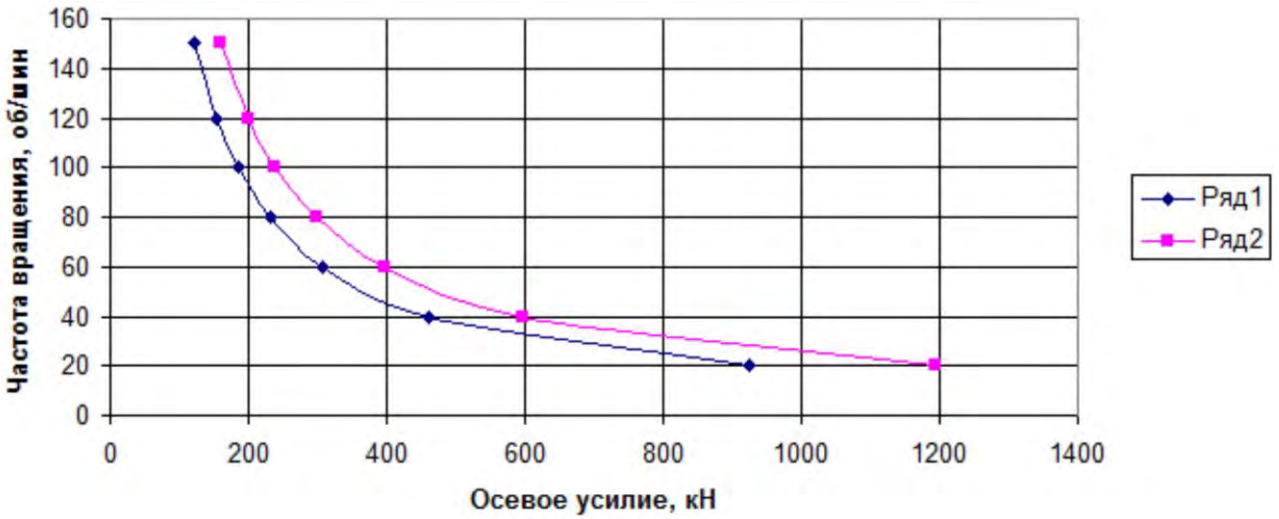


Рис. 4. Зависимости параметров бурения для горизонтов:
ряд 1 – +13 м; *ряд 2* – -17 м

Полученные значения соответствуют практическим данным, используемым при бурении скважин на карьере: при частоте вращения n=100 об/мин, осевом усилии $P_{ос}$=220 кН и крепости f=11 скорость бурения составляет $\upsilon_б$=11 об/мин.

Графически эти зависимости изображены на рис. 4.

Выводы

В результате исследований проведен анализ особенностей геологического строения Каракубского месторождения. Установлено, что при бурении взрывных скважин на горизонтах +3 м, +13, -17 м, -47 м, -77 м бурение проводится одним долотом по породам различной крепости и абразивности, что требует выбора оптимальных режимов бурения для производительной работы станка и уменьшения износа шарошечного долота. В предложенную ранее проф. Р.Ю. Подэрни модель взаимодействия бурового инструмента с горной породой введен показатель, учитывающий абразивность горных пород и материал вооружения долота, а также показатель, учитывающий проходку долота. Это позволило установить зависимости осевого усилия на буровой инструмент и скорости бурения от крепости и абразивности горных пород, а также от проходки долота. Получены расчетные данные и графические зависимости, подтверждающие работоспособность модели, которая позволяет решать как прямые, так и обратные задачи по определению параметров буровых работ. Таким образом, можно, задавшись крепостью, абразивностью горных пород и учитывая постоянную наработку долота, определить осевое усилие на буровой став, частоту вращения бурового става в любой момент времени работы бурового инструмента и при этом определять скорость бурения. Либо, задавшись скоростью бурения, крепостью и абразивностью горных пород, определять необходимое для этого осевое усилие на буровой инструмент и скорость вращения бурового става с учетом проходки долота. Данная модель позволит создать программу, учитывающую все необходимые условия проведения буровых работ и возможность автоматизации процесса бурения с выбором наиболее оптимальных режимов бурения, что в свою очередь позволит повысить производительность буровых станков и увеличить ресурс работы бурового инструмента.

Список литературы

1. Гилев, А.В. Проектирование рабочих органов и режимных параметров буровых станков для сложноструктурных горных массивов: монография / А.В. Гилев, А.О. Шигин, В.Д. Буткин. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 320 с.
2. Воробьев, А.Е. Технико-технологическое состояние буровой подотрасли России: монография. – Москва: РУДН, 2016. – 188 с.
3. Буткин, В.Д. Буровые машины и инструменты / В.Д. Буткин, И.И. Демченко. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 120 с.
4. ГОСТ Р 55736-2013. Оборудование горношахтное. Станки для бурения взрывных скважин на открытых горных работах. Общие технические требования и методы испытаний. – Разработан ОАО «Национальный научный центр горного производства – Институт горного дела им. А.А. Скочинского». – М.: Стандартинформ, 2014. – 32 с.
5. Подэрни, Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых горных работ: в 2 т. – М.: МГГУ, 2001. – 422 с.

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

6. Выбор и рациональная эксплуатация буровых инструментов и станков на карьерах: монография / В.Д. Буткин [и др.] – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. – 235 с.
7. Чефранов, К.А. Регулирование процесса бурения. – М.: Недра, 1976. – 160 с.
8. Нескоромных, В.В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 396 с.
9. Волик, Д.А. Буровые породаразрушающие инструменты. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014. – 94 с.
10. Додис, Я.М. Разрушение горных пород при бурении и взрывании / Я.М. Додис, В.И. Нифадьев. − Бишкек: КРСУ, 2006. – 374 с.
11. Барон, Л.И. Абразивность горных пород при добывании / Л.И. Барон, А.В. Кузнецов. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 213 с.
12. Mitchell, R.F. Fundamentals of Drilling Engineering / R. F. Mitchell, S.Z. Miska. – Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers, 2011. – 710 p.
13. Applied Drilling Engineering / Jr. Adam T. Bourgoyne [et al.]. – Second Printing. – Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers, 1991. – 508 p.
14. Prassl,W.F. Drilling Engineering. – Perth, Western Australia: Curtin University of Technology, Department of Petroleum Engineering, 1996. – 282 p.

O.F. Larionov
Donetsk National Technical University (Donetsk)

ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF BREAKING ROCK WITH ROLLER BITS OF DRILLING RIGS IN CONDITIONS OF KARAKUBIAN AND RODNIKOVSKIY DEPOSITS OF FLUX LIMESTONES

Background. *Drilling work in the quarries carried out for the construction of explosive wells, which have a small depth, about 12…15 meters, and on rocks of different strength, abrasiveness in complex geological conditions. Despite many years of experience in the operation of drilling tools and drilling rigs, there is a problem of increased wear of drill bits, low productivity of drilling rigs and low efficiency of drilling. The drilling work in Karakubian deposit of flux limestones conducted by SBSH-250 MNA-32 for rocks with a range of fortress according to the depth of the well from f=3 to f=11, and the rocks have different abrasiveness, fracture, grain. These factors complicate the choice of rational drilling modes, and it is necessary to take into account their influence in determining the drilling speed depending on the applied axial force.*
Materials and/or methods. *The analysis of the geological structure features of the Karakubian deposit of flux limestones carried out. In the selection method of drilling parameters proposed to take into account the abrasiveness of rocks, the material fortress of the drill bit and its penetration.*
Results. *The obtained dependences enable the determination of the drilling parameters at different combinations of the fortress, the abrasiveness of rocks, the frequency of rotation of the drilling rig and penetration of the drilling bit, which will allow optimal selection of the drilling mode and increase the productivity of drilling rigs and drilling tool life.*
Conclusion. *The results of the study show that the proposed model of interaction of the drilling tool with rock more effectively reflects the features of the influence of the fortress and abrasiveness of rocks on the wear of the drilling tool, allows taking into account the duration of the bit operation. Thus, you can define the parameters of drilling operations more accurately, which is confirmed by the practical data in the work of drilling machines at the quarry.*

Keywords: *drilling rig, roller bit, axial force, drilling speed.*

Сведения об авторе
О.Ф. Ларионов
SPIN-код: 2738-6441
ORCID iD: 0000-0003-1008-5362
Телефон: +380 (71) 318-46-97
Эл.почта: super.lariono2010@yandex.ua

Статья поступила 17.12.2018 г.
© О.Ф. Ларионов, 2019
Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев

УДК 629.11.01

С.А. Матвиенко /к.т.н./, А.В. Лукичев /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
Ю.Н. Стрельник
ОО ВПО «Донецкая академия транспорта» (Донецк)

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПРИ РАБОТЕ СФЕРИЧЕСКИХ ШАРНИРОВ ДОРОЖНЫХ МАШИН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Промоделирована кинематика работы шарнирного соединения на примере наконечника поперечной рулевой тяги автомобиля «МАЗ», оказывающая существенное влияние на износ, надежность и безопасность эксплуатации транспортных средств. На основании модели силового взаимодействия сопряженных деталей в наконечнике рулевой тяги, учитывающей характер контакта, проведено исследование расположения зоны износа сферической поверхности, которая влияет на изменение конструкции и технологии создания поверхностного слоя при изготовлении и восстановлении шаровых пальцев.

Ключевые слова: *шаровой палец, безопасность, зона контакта, трение, система координат, матрица поворота, напряжение, перемещение, деформация.*

Постановка проблемы

Кинематическая цепь рулевого привода транспортного средства включает в зависимости от вида подвижного состава несколько шарнирных соединений, в том числе шаровые. Шаровые шарниры предназначены для обеспечения подвижности и перемещения рулевых тяг по сложным траекториям. Техническое состояние рулевых тяг во многом определяет управляемость транспортного средства, а, значит, и безопасность его эксплуатации.

Основной причиной отказов при эксплуатации сферических шарниров транспортных машин является износ по массе [1]. Критерием долговечности для сферических шарниров служит нормативная предельная величина линейного зазора между шаровым пальцем и корпусом. В связи с неравномерностью распределения нагрузки и непостоянством относительных перемещений контактирующих зон в трибосопряжении наконечника рулевой тяги возникает неравномерный износ поверхности шарового пальца.

Исследование при моделировании кинематики закономерности неравномерного распределения износа (нагрузки) позволит обеспечить технологические параметры функционально-ориентированного упрочнения, что увеличит срок службы рулевого наконечника. В связи с этим одним из актуальных направлений в области повышения долговечности сферических шарниров транспортных машин, в том числе и наконечника рулевой тяги, в настоящее время является функционально-ориентированный подход к анализу и совершенствованию конструктивных и технологических параметров изготовления, эксплуатации и восстановления деталей типа шаровой шарнир.

Анализ последних исследований и публикаций

Рулевые тяги предназначены для передачи усилия, которым осуществляется поворот управляемых колес от рулевого механизма к поворотным рычагам ступиц, и обеспечения поворота управляемых колес на разные углы. Конструктивно рулевые тяги являются элементом рулевой трапеции.

На концах рулевых тяг закреплены шаровые шарниры, благодаря которым при взаимных перемещениях тяг, колес и кузова во время работы подвески сохраняется возможность передачи усилия от рулевого механизма и остается неизменным выбранный водителем угол поворота колес. Шаровой шарнир служит для соединения поперечной тяги с рычагом поворотной стойки колеса. Основной деталью шарнира является наконечник рулевой тяги. Сферическая часть шарового пальца располагается внутри прочного корпуса наконечника.

Эксплуатационными параметрами шарового шарнира являются: осевое усилие при перемещении шарового пальца, момент сопротивления шарового пальца повороту, его коэффициент

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

стабильности, обратимые и необратимые относительные смещения шарового пальца в осевом и радиальном направлениях.

Изучению силового взаимодействия и износа сферического шарового шарнира посвящены работы [2...9]. В работе [10] получено качественное и количественное представление о силах и моментах трения в сферических шарнирах. В работе [6] была установлена взаимосвязь между перемещениями в системе втулка-шарнир шаровой опоры. На основании полученных данных был сделан вывод о неравномерности износа на поверхности шарнирного пальца.

Общий подход к учету эффектов, обусловленных трением в шарнирных узлах, предложен в работе [10]. Подход основан на положении теории упругости о том, что при значительных нагрузках силовое взаимодействие между сферической поверхностью пальца и сухарями (вкладышами) шарнира распределено по области их контакта, размеры которой не малы по сравнению с размерами шарнира.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящего исследования является получение качественного представления о кинематике работы шарнирных узлов на примере наконечников рулевых тяг автомобиля «МАЗ», позволяющего составить матрицы поворота, на базе которых при дальнейших исследованиях и моделировании получена система уравнений движения шарового пальца, наиболее подверженной износу и разрушению детали наконечника рулевой тяги, а также оценка напряженно-деформированного состояния шарового пальца.

Основной материал исследования

Для получения качественного представления о фактическом расположении зон износа рассматриваются характерные частные случаи распределения контактного давления на границе контакта сферической поверхности шарового пальца и вкладышей.

На величину износа сферической поверхности шарового пальца влияют контактные напряжения, возникающие под действием внешней нагрузки, а также скорость скольжения и площадь контакта. Внешний вид исследуемого наконечника рулевой тяги представлен на рис. 1.

Силовое взаимодействие в рулевом наконечнике осуществляется через зону контакта S сферической поверхности шарового пальца и внутренней полусферической поверхности стакана. Площадь зоны контакта S соизмерима с размерами шарнира, в связи с чем нельзя заменить распределенную нагрузку по области контакта S сосредоточенной силой реакции. Рулевая тяга совершает только возвратно-поступательное движение в координатной плоскости OXY, при этом продольная ось рулевой тяги остается параллельной координатной оси OY (рис. 2).

Положение, и размеры зоны контакта, и распределение нагрузки в определенный момент времени определяются соответствующими внешними и инерционными силами и моментами.

Пусть $p(M)$, $M \in S$ – вектор нормального давления в точке M в зоне контакта пальца со стаканом. Силовое взаимодействие в каждой точке контактной поверхности шарнира эквивалентно сосредоточенной силе $F_n(M)$, проходящей через центр шарнира и представляющей собой равнодействующую распределенных по S сил.

$$F_n = \iint_S p(M)dS\,. \qquad (1)$$

Условно принято, что силы F_n направлены к центру сферической поверхности шарового пальца рулевой тяги.

Для рассматриваемого шарового шарнира сила нормального давления при известной равнодействующей распределенных по зоне контакта сил определяется при решении контактных задач теории упругости при условии приблизительного совпадения радиусов контактируемых сферических исполнительных поверхностей. Соответственно, зона контакта для рассматриваемого случая может быть больше площади точки.

Согласно положениям контактной задачи теории упругости контактное взаимодействие в шаровом шарнире носит осесимметричный характер. В этом случае сила нормального давления $p(M)$ в области контакта S зависит только от угла θ между векторами F_n и ρ:

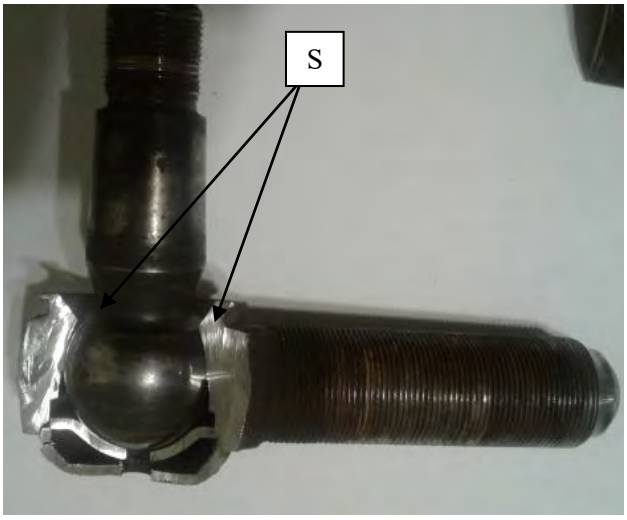


Рис. 1. Наконечник рулевой тяги

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

$$p(M) = p(\theta),\ M \in S. \qquad (2)$$

В качестве зависимости, аппроксимирующей точное распределение нормального давления в области контакта для сферического шарнира, можно использовать формулу:

$$p(\theta) = p_1(\theta_0)\cos(\theta)\sin(\alpha), \qquad (3)$$

где угол широты θ изменяется в пределах: $\theta_1 \le \theta \le \theta_2$, а угол долготы α: $0 \le \alpha \le \pi$.

Область контактного взаимодействия представляет собой сферический пояс:

$$S: \theta_0 \le \theta \le \pi - \theta_0, \theta \succ 0. \qquad (4)$$

Положение любой точки $M \in S$ определяется углом θ. Распределение давления $p=p(\theta)$ по области контакта S представляет собой функцию θ, удовлетворяющую при заданной величине R_n соотношению [10]:

$$\int_{-\theta_0}^{\theta_0} p(\theta)\cos(\theta)\rho d\theta = R_n. \qquad (5)$$

При создании математической модели для приближенной оценки интенсивности износа сферической поверхности пальца в шарнире наконечника поперечной рулевой тяги приняты следующие допущения:

– используем кулоновскую модель трения, когда сила трения пропорциональна нормальной силе давления, а вектор силы трения направлен в сторону, противоположную вектору движения;

– износ рабочей сферической поверхности: а) пропорционален совершенной работе сил трения и характеризуется как локальное изменение объема; б) обратно пропорционален поверхностной твердости материала на поверхности трения.

В качестве неподвижной системы координат, связанной с шарнирным узлом, выберем декартову прямоугольную правую систему координат OXYZ, начало которой поместим в точку симметрии сферической части шарнира O. Ось OZ направлена вертикально вверх из точки O. Вектор P лежит в плоскости OXY и направлен перпендикулярно плоскости XOZ. Направление оси OY противоположно направления вектора P. Ось OX перпендикулярна плоскости OYZ.

Считаем, что цилиндрическая часть шарового пальца шарнирного узла направлена вверх, жестко закреплена в поворотном рычаге и совпадает (или составляет постоянный угол) с осью аппликат OZ в каждый момент времени. Продольная ось поперечной рулевой тяги параллельна оси ординат OY и в процессе движения остается неподвижной в системе координат OXYZ, при этом шарнирные вкладыши (сухари) жестко связаны с системой сухари–шарнир–тяга и неподвижны относительно системы координат OXYZ.

Следовательно, движение рассматриваемой системы (сухари–палец) при повороте управляемых колес транспортного средства может быть формально описано как вращательное движение шаровой части пальца вокруг неподвижной точки O – центра симметрии шаровой части.

Рассмотрим следующую модель движения. При повороте колес транспортного средства на угол φ шаровой палец в шарнире совершает поворот на угол φ в плоскости OXY, одновременно поворачиваясь в плоскости OYZ на угол θ. Это отклонение обусловлено изгибом пальца в плоскости OYZ под действием изгибающей нагрузки – сосредоточенной силы P, действующей перпендикулярно плоскости OXZ.

Свяжем с шаровым пальцем «вмороженную» в него местную правую прямоугольную декартову систему координат Oξηζ, центр которой совпадает с центром сферической части шарового пальца и с центром системы координат OXYZ.

Тогда в каждый момент времени положение пальца относительно шарнира может быть описано соотношениями поворота местной системы координат Oξηζ относительно неподвижной системы OXY.

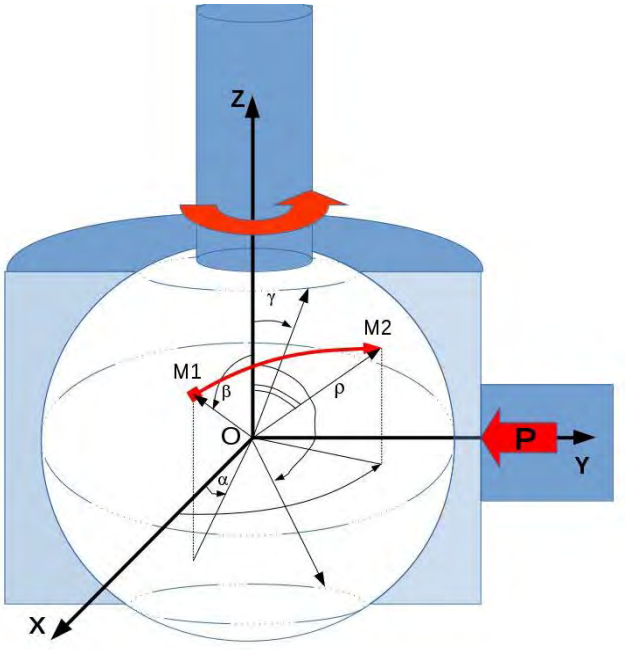


Рис. 2. Схема движения сферической части пальца в шарнире наконечника поперечной рулевой тяги

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

Рассмотрим точку M, лежащую на поверхности сферической части шарнира, в которой действует сосредоточенная сила $P(M)$. Положение этой точки в системе координат Oξηζ определяется вектором $\rho=\rho(\xi,\eta,\zeta)$. Положение этой же точки в системе координат OXYZ определяется вектором $R=R(X,Y,Z)$. Для определенности будем полагать, что в начале движения координатные оси систем совпадают, тогда совпадают и точки M_1 и M_2. Любое вращение вектора в трехмерном пространстве может быть представлено как композиция поворотов этого вектора вокруг трех ортогональных осей, например, вокруг осей OX, OY, OZ декартовых координат OXYZ [11].

Матрицы поворота вокруг осей декартовой системы координат на соответствующие углы α, β, γ в трехмерном пространстве с неподвижной системой координат OXYZ определяются следующим образом [11]:

$$M_x(\alpha)=\begin{vmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha)\\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha)\end{vmatrix},$$

$$M_x(\beta)=\begin{vmatrix}\cos(\beta) & 0 & \sin(\beta)\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta)\end{vmatrix}, \qquad (6)$$

$$M_z(\gamma)=\begin{vmatrix}\cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0\\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0\\ 0 & 0 & 1\end{vmatrix}.$$

Ниже представлены уравнения координат точки в поворотной системе координат.

$$X=\rho(\cos(\alpha+\varphi)\sin(\beta)),$$

$$Y=-\rho(\cos(\beta)\sin(\theta)+\cos(\theta)\sin(\beta)\sin(\alpha+\varphi)), \quad (7)$$

$$Z=\rho(\cos(\beta)\cos(\theta)+\sin(\beta)\sin(\theta)\sin(\alpha+\varphi)).$$

Положительным углам при этом соответствует вращение вектора против часовой стрелки в правой системе координат и по часовой стрелке в левой системе координат, если смотреть против направления соответствующей оси.

Аналогично определяются и матрицы поворота вокруг осей декартовой системы координат в трехмерном пространстве, если в качестве неподвижной считать систему координат Oξηζ.

Основное влияние на неравномерность износа сферической поверхности шарнира, кроме кинематических параметров (скорости скольжения), оказывает контактное напряжение. Для моделирования напряженно-деформированного состояния исследуемой детали под действием приложенной вынуждающей силы используется статический анализ. Статический анализ состояния шарового пальца при статической нагрузке выполняем в программе Solidworks. Для построения модели, адекватно отражающей физическую сущность и свойства исследуемой детали, применяется метод конечных элементов. Разбивка выполнялась равномерной сеткой вдоль длины и диаметра, которая дала 11566 узлов и 7470 конечных элементов (рис. 3). В целом проведенные кинематический и силовой анализы позволяют реализовать функционально-ориентированный подход к совершенствованию конструкции и проектированию технологических воздействий при отделочно-упрочняющей обработке сферической поверхности шарового шарнира.

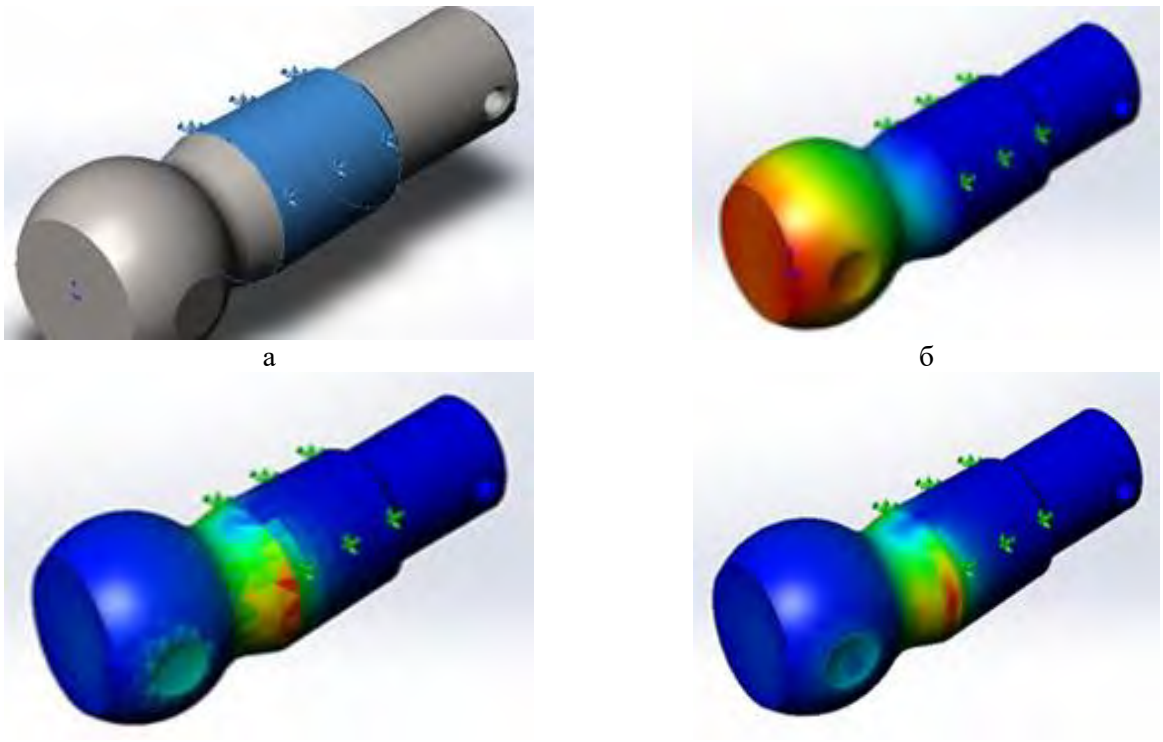
Физические и основные механические характеристики материала выбраны для легированной стали 40Х. Расчет значений перемещений и напряжений выполнен для случая статического нагружения.

Статический анализ выполнялся для двух случаев: с приложением боковой силы на малой площадке, искусственно введенной для исследования (рис. 4), и с приложением распределенной нагрузки по нижней поверхности детали (рис. 5). Первый случай характерен для поворота модели, а второй случай – для статического состояния. Закрепление модели одинаковое в обоих случаях. Этот анализ позволил уточнить зоны максимальных напряжений и деформаций, которые в дальнейшем и определят зоны максимального износа сферической поверхности.



Рис. 3. Модель шарового пальца

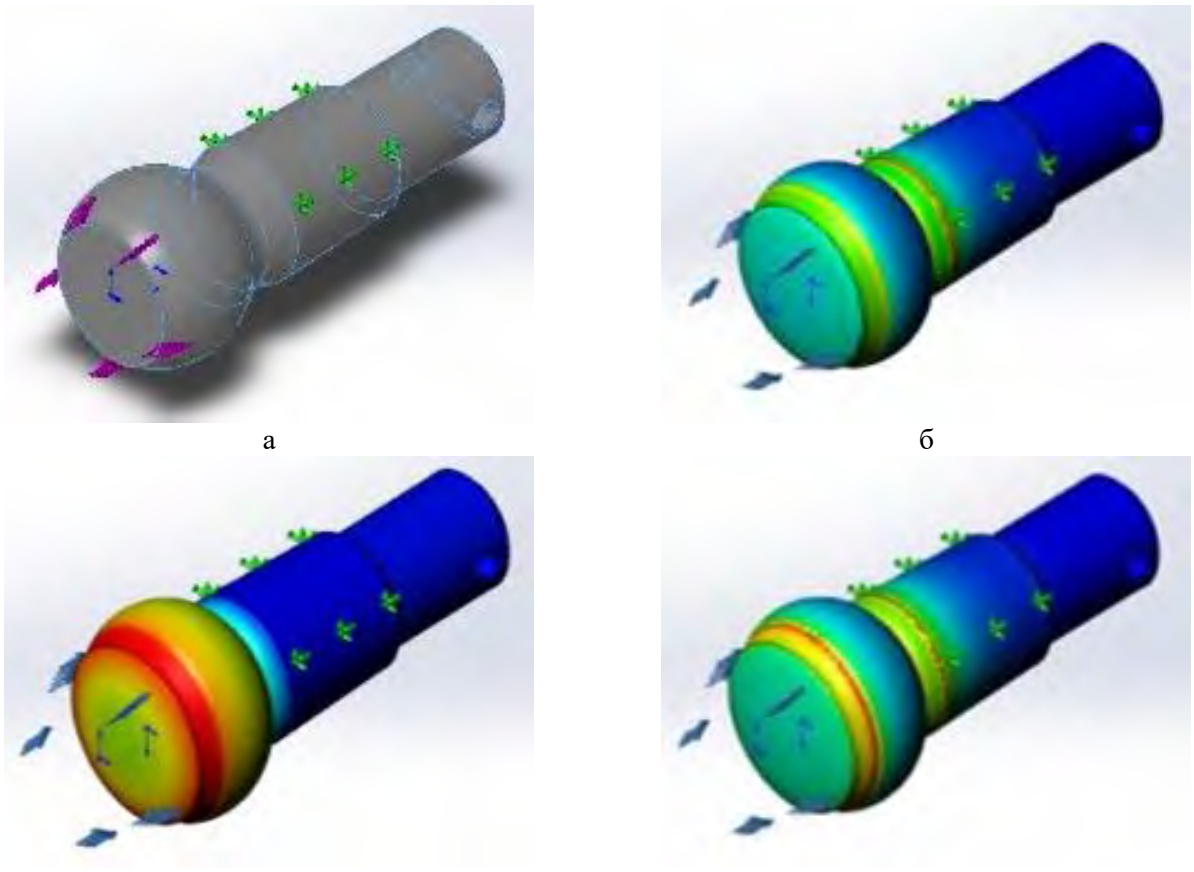
ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

в г

Рис. 4. Статический анализ напряженно-деформированного состояния модели шарового пальца под воздействием внешней боковой силы: *а* – схема закрепления модели; *б* – перемещение; *в* – деформация; *г* – напряжение



а б

в г

Рис. 5. Статический анализ напряженно-деформированного состояния под воздействием распределенной нагрузки на нижнюю поверхность модели шарового пальца: *а* – схема закрепления модели; *б* – перемещение; *в* – деформация; *г* – напряжение

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

Выводы

Таким образом, выполнено моделирование кинематики работы шарового шарнира наконечника рулевой тяги, в результате которого рассмотрена возможность применения для вывода математической модели износа шарового шарнира наконечника рулевой тяги матриц поворота. Выведены уравнения координат точки сферической поверхности шарового пальца в поворотной системе координат. В результате статического анализа модели, выполненного в программе Solidworks, определены зоны максимальных напряжений и деформаций шарового пальца, которые в дальнейшем и определят зоны максимального износа детали. Это зона перехода цилиндрической части в сферическую и зоны сферической поверхности, подверженные нагрузке, т.е. зоны непосредственного контакта с поверхностью вкладыша. Получены исходные данные для аналитического расчета износа шарнира и проектирования технологических воздействий.

Список литературы

1. Кузьменко, А.Г. Жесткий контакт шара и плоскости с учетом износа. Неустановившийся износ / А.Г. Кузьменко, С.В. Сытник, Г.А. Кузьменко // Проблемы трибологии. – 2009. – №3(9). – С. 27-35.
2. Fischer, I.S. Velocity analysis of mechanisms with ball joints / Mechanics Research Communications. – 2003. – No.30. – P. 69-78.
3. Леутин, А.П. Об определении системы сил реакций в шарнирных узлах крепления летательных аппаратов при их разделении // Ученые записки ЦАГИ. – 1981. – № 4. – Т.XII. – С. 85-96.
4. Кузьменко, А.Г. Износ в шаровых опорах рулевого управления автомобиля (расчеты и испытания) / А.Г. Кузьменко, С.В. Сытник // Проблемы трибологии. – 2008. – №3. – С. 94-120.
5. Кузьменко, А.Г. Методы испытаний на износ при переменной площадке контакта с определением параметров kw, m модели изнашивания (МПП) kw, m / Проблемы трибологии. – 2014. – №1. – С. 123-138.
6. Михайлов, А.Н. Расчет относительных перемещений в системе втулка-палец шаровой опоры / А.Н. Михайлов, А.Н. Голубов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. – № 4(55). – С. 10-17.
7. Kang, J. Theoretical model of ball joint squeak / Journal of Sound and Vibration. – 2011. – No.330. – P. 5490-5499.
8. Тебекин, М.Д. Повышение эффективности определения технического состояния шаровых шарниров подвески легкового автомобиля: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Тебекин Максим Дмитриевич. – Орел, 2015. – 158 с.
9. Ossa, E.A. Failure analysis of a car suspension system ball joint / E.A. Ossa, C.C. Palacio, M.A. Paniagua // Engineering Failure Analysis. – 2011. – No.18. – P. 1388-1394.
10. Ильин, В.А. Сила трения и момент сил трения в шарнирных узлах крепления при развороте двух летательных аппаратов относительно этих узлов / Ученые записки ЦАГИ. – 1985. – №3. – Т.16. – С. 79-91.
11. Лурье, А.И. Аналитическая механика. – М.: Физматлит, 1961. – 824 с.

S.A. Matvienko /Cand. Sci. (Eng.)/, O.V. Lukichov /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
Yu.N. Strelnik
Donetsk Academy of Transport (Donetsk)

MODELING THE KINEMATICS OF THE ROAD CAR SPHERICAL JOINTS AT WORK IN ORDER TO IMPROVE THEIR OPERATION SAFETY

Background. *The main cause of failures of spherical joints of transport vehicles is uneven wear. The kinematics model of the regularity of uneven load distribution (wear) will provide the technological parameters of the functionally-oriented hardening, which will increase the service life of the steering tip. In this regard, the actual direction of improving the safety of spherical joints of transport vehicles is a functionally-oriented approach to the design and technological parameters of the manufacture, operation, and restoration of parts such as ball joint.*

Materials and/or methods. *The force interaction in the steering tip occurs through the contact zone of the spherical surface of the ball pin and the inner hemispherical surface of the cup. The force interaction at each point of the contact surface of the joint is equivalent to the concentrated force passing through the center of the joint and representing the resultant forces distributed over the contact zone. The force of the normal pressure at the known resultant force distributed over the contact zone determined by solving the contact problems of the theory of elasticity under the condition*

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

of approximate coincidence of the radii of the contacting spherical working surfaces. If associate a local Cartesian coordinate system with a ball pin, then at each time moment the position of the pin relative to the joint can be described by the relation of rotation of the local coordinate system with respect to the fixed system. For further research adopted the rotation matrices around the axes of the Cartesian coordinate system at the appropriate angles in three-dimensional space with a fixed coordinate system. As a result of the static analysis of the model performed in Solidworks, the zones of maximum stress and strain of the ball pin defined which determine the zone of maximum wear of the component.

Results. *The modeling of the kinematics of the ball joint of the steering rod tip carried out by using rotation matrices for the mathematical model of wear of a joint. The equations of coordinates of a point of a spherical surface of a ball pin in a mobile coordinate system derived. As a result of the static analysis of the model made in Solidworks, the zones of maximum stresses and strains of the ball pin defined, which determine the zone of maximum wear of machine parts. The initial data for the analytical determination of wear of the joint and designing technological influences obtained.*

Conclusion. *To derive a mathematical model of the ball pin motion rotation matrices used.*

Keywords: *ball pin, safety, contact area, friction, coordinate system, rotation matrix, stress, displacement, deformation.*

Сведения об авторах

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

Ю.Н. Стрельник
SPIN-код: 8999-4900
Телефон: +380 (71) 307-62-21
Эл. почта: yura-strelnik@yandex.ru

А.В. Лукичев
SPIN-код: 9580-9623
Телефон: +380 (71) 369-05-10
Эл. почта: a_lukichov@mail.ru

Статья поступила 28.02.2019 г.
© С.А. Матвиенко, А.В. Лукичев, Ю.Н. Стрельник, 2019
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко



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

УДК 621.867.2

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ КОНВЕЙЕРНЫХ РОЛИКОВ С РАЗРЕЗНОЙ ОСЬЮ

Разработана конструкция конвейерного ролика с разрезной осью, у которого подшипники практически не имеет пустот, что предотвращает попадание пыли при засасывании воздуха из-за нагрева и остывания ролика. Установлены напряжения и деформации, возникающие во время его нагружения. Проведенные исследования показывают, что формирующиеся под нагрузкой 500 Н деформации обечайки ролика с разрезной осью составляют не более 0,003 мм. При этом максимальные напряжения достигают $1{,}05 \cdot 10^7$ Н/м^2, что значительно меньше предела текучести применяемого материала.

Ключевые слова: *конвейер, ролик, обечайка, ось, подшипниковый узел, нагрузка, деформация.*

Постановка проблемы

Эффективность функционирования ленточных конвейеров во многом зависит от работоспособности роликоопор. Срок службы роликоопор определяется главным образом износом подшипниковых узлов и обечаек роликов. При нормальном состоянии подшипниковых опор ролика его обечайка имеет минимальный износ, а при выходе из строя подшипниковых опор, особенно при заклинивании – обечайка интенсивно изнашивается и эксплуатация ленточного конвейера становится невозможной [1,2].

Анализ последних исследований и публикаций

Исследованию работоспособности роликов ленточных конвейеров посвящен ряд работ [3…7]. Анализ их функциональных параметров выполнен в работах [8…10]. Опыт практической эксплуатации показывает, что во время работы конвейера, когда ролик нагревается, внутри его полости увеличивается давление. Во время остановки, когда ролик остывает – давление внутри его полости снижается и в подшипниковые узлы через уплотнения засасывается пыль, препятствующая нормальной работе подшипников.

Этого недостатка лишены конвейерные ролики с разрезной осью [11,12]. Однако в указанных работах не проведены исследования деформаций обечайки, подшипниковых узлов и оси ролика. Большинство роликов с разрезной осью имеют крепление подшипникового узла на кронштейне роликоопоры, что не позволяет применять их на существующих ленточных конвейерах и требует изготовления специальных кронштейнов. Настоящая статья является продолжением указанных исследований.

Цель (задачи) исследования

Цель работы заключается в установлении деформаций обечайки ролика с разрезной осью, что позволит обосновать параметры его крепления на ставе ленточного конвейера.

Основной материал исследования

Общий вид разработанного ролика с разрезной осью показан на рис. 1. В его состав входит моноблочная обечайка, имеющая закрытую герметичную внутреннюю полость и две внешние полости для размещения подшипниковых узлов с полуосью.

В подшипниковом узле используется двухрядный подшипник с закрытым исполнением и со смазкой на весь период эксплуатации. Объем внешней полости значительно меньше объема внутренней полости, а подшипник практически не имеет пустот, что предотвращает попадание пыли при засасывании воздуха из-за нагрева и остывания ролика.

Две полуоси подшипникового узла образуют разрезную ось, присоединительные размеры которой не отличаются от размеров стандартного ролика. Это обеспечивает взаимозаменяемость разных типов роликов без дополнительных изменений в конструкции роликоопор ленточного конвейера. При этом длина двух полуосей значительно меньше длины сплошной оси, что позволяет снизить общую массу ролика.

Однако обечайка ролика с разрезной осью воспринимает дополнительные изгибные напряжения, которые обычно воспринимает сплошная ось.

Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании роликоопоры ленточного конвейера.

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

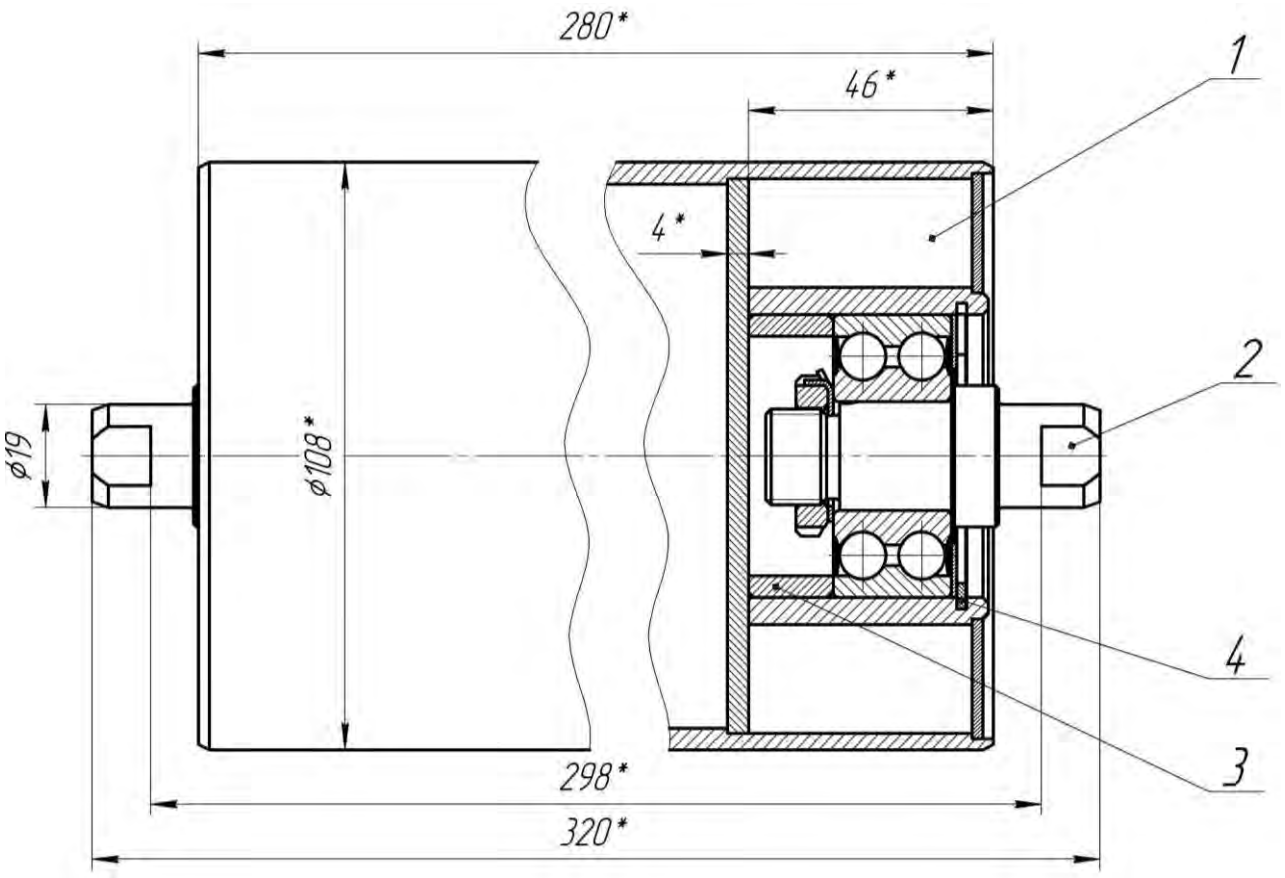


Рис. 1. Общий вид конвейерного ролика с разрезной осью:
1 – корпус; *2* – подшипниковый узел; *3* – упорная втулка; *4* – стопорное кольцо

Для проведения исследований напряжений в обечайке разработана 3D-модель ролика с разрезной осью, общий вид которой показан на рис. 2, что позволило с использованием метода конечных элементов определить напряжения, перемещения и деформации, возникающие во время нагружения обечайки.

В качестве материала для обечайки и полуосей принята обычная углеродистая сталь с пределом текучести $2{,}206 \cdot 10^8$ Н/м^2 и пределом прочности при растяжении $3{,}998 \cdot 10^8$ Н/м^2. Ее плотность равна 7800 кг/м^3, коэффициент Пуассона – 0,28, модуль упругости – $2{,}10 \cdot 10^{11}$ Н/м^2, а модуль сдвига – $7{,}90 \cdot 10^{10}$ Н/м^2.

Исследования проводились с использованием программного обеспечения SOLIDWORKS Simulation. Для этого первоначально выполнялась имитация закрепления концов оси ролика. Причем один из концов оси жестко фиксировался, а другой размещался в направляющих с возможностью продольного смещения относительно кронштейна роликоопоры конвейерного става.

Далее к верхней части обечайки прикладывались распределенные нагрузки. Зона действия нагрузок ограничивалась эллипсом, наибольшая ось которого принималась равной длине обечайки, а наименьшая соответствовала углу обхвата ролика конвейерной лентой. Результирующая нагрузка составляла 500 Н, что было обусловлено прочностью кронштейнов роликоопор. После этого выполнялась разбивка составных частей ролика на конечные элементы. В завершение проводилось моделирование напряжений в обечайке ролика, результаты которого приведены на рис. 2.

Анализ исследований показал, что максимальные напряжения в обечайке достигаются в центральной части зоны нагружения и составляют $1{,}05 \cdot 10^7$ Н/м^2. Указанные напряжения не превышают предел текучести принятого материала.

Результаты моделирования статических перемещений обечайки ролика под нагрузкой показаны на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что максимальные статические перемещения обечайки ролика с разрезной осью составляют не более 0,004 мм. Аналогично определялась деформация ролика. При нагрузке 500 Н максимальная эквивалентная деформация составляла $2{,}75 \cdot 10^5$. В итоге коэффициент жесткости обечайки, равный силе, вызывающей единичное перемещение в характерной точке, составит $1{,}67 \cdot 10^5$ Н/мм.

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

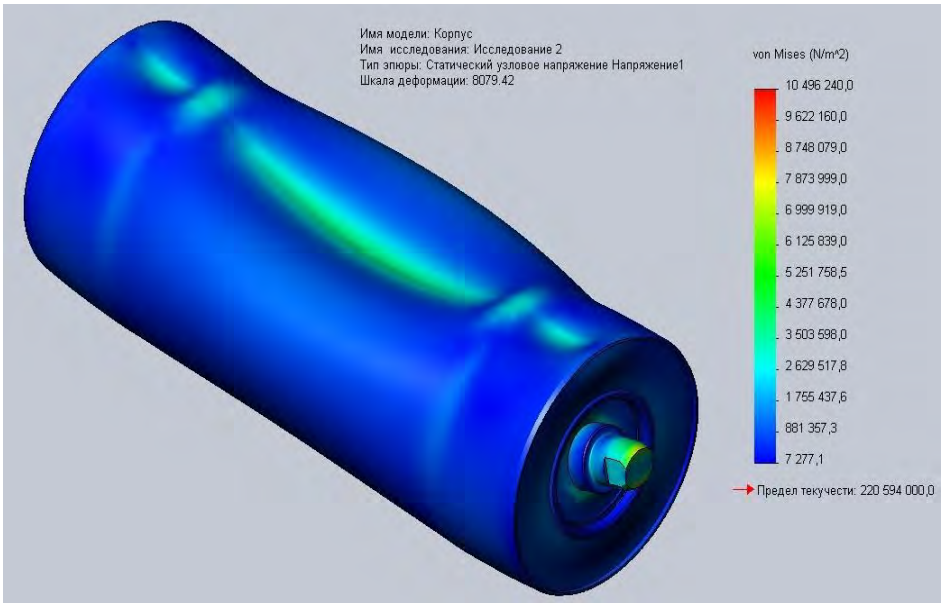


Рис. 2. Результаты моделирования напряжений в обечайке ролика

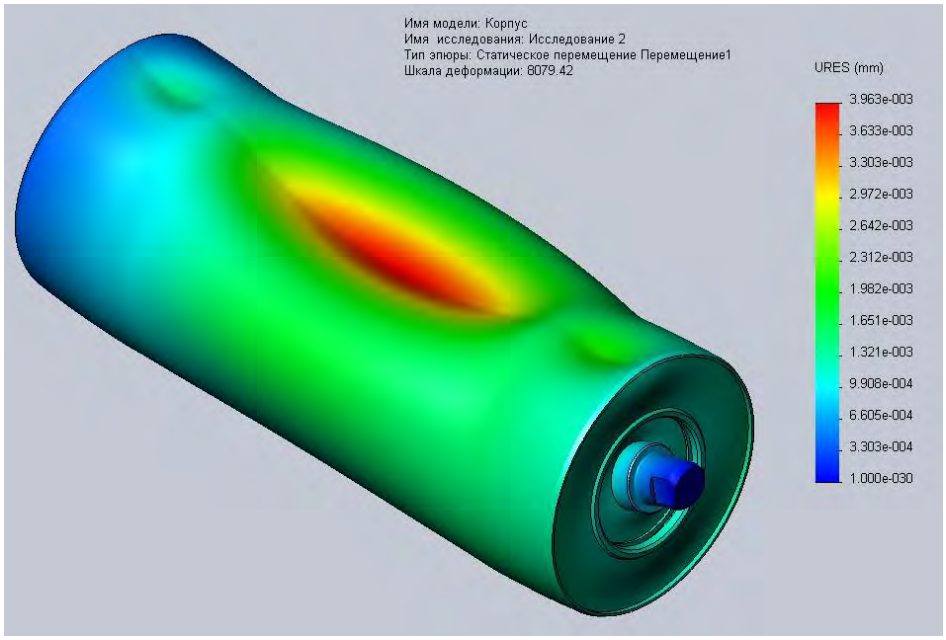


Рис. 3. Результаты моделирования статических перемещений обечайки ролика под нагрузкой

Выводы

Разработанная конструкция конвейерного ролика с разрезной осью предотвращает попадание пыли при засасывании воздуха из-за нагрева и остывания обечайки. Его конструкция обеспечивает взаимозаменяемость с различными типами роликов и не требует дополнительных изменений кронштейнов конвейерного става.

Проведенные исследования 3D-модели ролика с разрезной осью показывают, что возникающие под нагрузкой 500 Н деформации обечайки ролика с разрезной осью составляют не более 0,004 мм. При этом максимальные напряжения в обечайке достигают $1{,}05 \cdot 10^7$ Н/м^2, что значительно ниже предела прочности материала, из которого она изготавливается.

Список литературы

1. Расчеты и проектирование транспортных средств непрерывного действия: учеб. пособие для вузов. / А.И. Барышев [и др.]; под общ. ред. В.П. Кондрахина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: ГОУВПО «ДонНТУ», 2017. – 689 с.
2. Проектирование и конструирование транспортных, подъемных машин и комплексов / В.А. Будишевский [и др.]; под общ. ред. В.А. Будишевского. – Донецк: Норд-Пресс, 2009. – 599 с.
3. Корнеев, С.В. Анализ факторов, определяющих силу сопротивления вращению роликов ленточных конвейеров / С.В. Корнеев, В.П. Долгих // Сборник трудов ДонГТУ. – 2013. –

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

Вып.41. – С. 33-36.
4. Корнеев, С.В. Сопротивление движению конвейерной ленты, возникающее при прохождении роликоопоры / С.В. Корнеев, В.П. Долгих // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – №94. – С. 20-25.
5. Скляров, В.Н. Экспериментальные исследования роликов шахтных ленточных конвейеров повышенной долговечности / Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – №4(10). – С. 34-38.
6. Скляров, В.Н. Разработка ролика шахтных ленточных конвейеров повышенной долговечности и ремонтопригодности / Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – №2. – С. 194-200.
7. Суглобов, В.В. Экспериментальные исследования ленточных конвейеров в производственных условиях / В.В. Суглобов, П.А. Гринько // Наука и производство. – 2017. – Вып.17. – С. 77-81.
8. Yuan, X. Q. Analysis and Design of the Roller for Belt Conveyor Based on ANSYS / X. Q. Yuan, S. Y.Yang, Q. Y. Niu // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol.1027. – P. 315-319.
9. Furmanik, K. J. Analysis of load application on idler roller bearing of belt conveyor in different dynamic models / Journal of Friction and Wear. – 2009. –Vol.30. Iss.2. – P. 142-147.
10. Fedorko, G. The Calculation of Force Effects of a Conveyor Belt of the Pipe Conveyor to Forming Rollers by FEM / G. Fedorko, V. Molnár, P. Michalik // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol.806. – P. 181-186.
11. Подъемно-транспортные машины / М.П. Александров. – 6-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1985. – 520 с.
12. Транспорт на горных предприятиях / Б.А. Кузнецов [и др.]; под ред. Б.А. Кузнецова. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1976. – 550 с.

V.N. Sklyarov
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE DEFORMATIONS STUDY OF CONVEYOR ROLLERS WITH A SPLIT AXLE

Background. *The paper deals with the reasons for reducing the durability and efficiency of belt conveyors, consisting in the ingress of dust into the inner cavity of the bearings when the air sucked due to heating and cooling of the rollers supporting the belt of the roller carriage.*
Materials and/or methods*. The author carried out the analysis of researches and publications on the subject, including an analysis of the functional parameters. A 3D-model of the roller with a split axle developed for stress studies in the roller shell.*
Results. *The study of the 3D-model of the roller with the split axle shows that the deformation of the roller shell with the split axle occurring under load of 500 N is not more than 0.004 mm, while the maximum stresses in the shell reach $1.05 \cdot 10^7$ N/m^2, which is much lower than the ultimate strength of the material from which it is made.*
Conclusion. *The maximum stresses in the roller shell indicate that they are significantly lower than the tensile strength of the material from which it is made.*

Keywords: *conveyor, roller, shell, axle, bearing unit, load, deformation.*

Сведения об авторе
В.Н. Скляров
SPIN-код: 5546-1135
ORCID iD: 0000-0002-9630-9592
Телефон: +380 (62) 301-08-54
Эл. почта: vladimirnikol777@mail.ru

Статья поступила 09.01.2019 г.
© В.Н. Скляров, 2019
Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев

УДК 621.316.9

И.А. Бершадский /д.т.н./, С.В. Шлепнев /к.т.н./
ГУО ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
А.Ю. Гладков
ГУ «Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности» (Макеевка)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАЗРЯДА ЕМКОСТНОЙ ИСКРОБЕЗОПАСНОЙ ЦЕПИ

Приведены и проанализированы экспериментальные зависимости напряжения на разряде, тока разряда Ip от времени при замыкании омической цепи. Уточнены экспериментальным путем постоянная времени установления напряжения на разряде τ и установившееся значение напряжения на разряде, не зависящие от уровня напряжения цепи. Разработана и обоснована усовершенствованная математическая модель разряда емкостной электрической цепи, позволяющая уточнить известный расчетный метод оценки ее искробезопасности.

Ключевые слова: *расчетные методы оценки искробезопасности, напряжение на разряде, энергия разряда, длительность разряда, математическая модель разряда.*

Постановка проблемы

В большинстве случаев взрывозащищенное электрооборудование с видом взрывозащиты «искробезопаная электрическая цепь» содержит емкостные цепи, определяемые наличием конденсаторов в электрической схеме.

Таким образом, на стадии разработки и при испытаниях данного электрооборудования неоднократно возникает необходимость оценки искробезопасности последовательного, параллельного или смешанного соединения емкостных цепей. Данная оценка на сегодняшний день может быть выполнена как экспериментальным методом с помощью взрывных камер, заполненных испытательной взрывоопасной смесью [1,2], так и расчетными методами [3,4,5].

За счет более высокой достоверности и информативности полученных воспламеняющих параметров, меньшего времени испытаний, возможности в процессе оценки выбирать оптимальные параметры электрооборудования с точки зрения обеспечения взрывобезопасности (учитывается запас) актуальность расчетных методов оценки возрастает.

Анализ вышеуказанных расчетных методов показал, что метод [3] является наиболее перспективным на сегодняшний день, т. к. он имеет самую низкую погрешность (10…20 %) значений емкости цепи, полученных при моделировании и из графиков зависимостей $C(U,R)$ [6]. При этом выявлено расхождение значений параметров разряда (продолжительность, энергия разряда, максимальный ток), полученных при моделировании данным методом и путем эксперимента [7], которое достигает 16…20 %.

Поэтому задача совершенствования математической модели данного метода является актуальной и требует исследований в части уточнения и обоснования ее параметров, обеспечивающих снижение расхождения результатов моделирования и экспериментальных данных.

Анализ последних исследований и публикаций

Основой расчетного метода оценки искробезопасности [3] является математическая модель разряда замыкания. Данная модель основана на постоянстве напряжения на разряде в установившемся режиме на уровне 11 В, экспоненциальном снижении напряжения разряда с начального до установившегося значения с постоянной времени 10^{-9} с.

Согласно [8] для разрядов размыкания установлено, что при положительной полярности на вольфрамовом электроде установившееся значение напряжения на разряде составляет 9,3…11,3 В, а при отрицательной – 8,5…10,3 В. При этом данный уровень не зависит от его начального тока.

В то же время, согласно [9], для разрядов замыкания установлено, что при положительной полярности на вольфрамовом электроде установившееся значение напряжения на разряде составляет 7,6…10,0 В, а при отрицательной – 8,5…10,1 В. При этом данный уровень не зависит от его начального тока. При различных напряжениях больше энергии выделяется в разряд при полярности *WO+Cd-*, которая должна учитываться в компьютерной модели разряда.

Таким образом, в математической модели

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

разряда замыкания значение установившегося уровня напряжения на разряде соответствует полярности *WO+Cd-,* полученной экспериментально при разрядах размыкания, и не учтены результаты экспериментальных исследований аналогичной величины для разрядов замыкания.

Время установления напряжения на разряде составляет примерно 0,1 мкс и соответствует времени образования при пробое стримеров – узких проводящих (заполненных плазмой) каналов, исходящих от одного из электродов [10]. Следовательно, постоянная времени данного процесса составляет 33 нс.

Для обеспечения условия выделения в разряде за 0,1 мкс всей энергии, накопленной в конденсаторе, постоянная времени установления напряжения на разряде должна быть не более 10^{-9} с [7]. Соответственно, при постоянной времени 33 нс, выделится примерно 94 % от всей энергии конденсатора.

Таким образом, в математической модели разряда замыкания значение постоянной времени соответствует условию выделения всей энергии конденсатора и учитывает время образования при пробое стримеров.

Цель (задачи) исследования

Цель работы состоит в разработке усовершенствованной математической модели разряда емкостной искробезопасной цепи, обеспечивающей снижение расхождения результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных на искрообразующем механизме с помощью современных регистрирующих приборов.

Основной материал исследования

Анализ последних исследований и публикаций показал, что параметры, принятые в математической модели [3], не учитывают результаты данных исследований. Для уточнения параметров данной модели необходимо исследовать экспериментальные зависимости формирования напряжения на разряде от времени при различных напряжениях цепи.

С целью формирования экспериментальных зависимостей переходных процессов замыкания *RC*, *RLC* цепей (ток разряда и напряжение на разряде), приближенных по параметрам к переходным процессам, возникающим при проведении оценки экспериментальным методом с помощью взрывных камер, спроектирован специальный искрообразующий механизм (ИМ) разрядов замыкания (рис. 1).

ИМ представляет собой основание из диэлектрического материала 2, на котором закреплены пружинная проводящая пластина 3 фиксатором 1 и кадмиевый диск 5, используемый в искрообразующем механизме при испытаниях электрических цепей камерным способом. В свою очередь, на конце пружинной пластины закреплена изогнутая вольфрамовая проволока 4 диаметром 0,2 мм, также используемая в искрообразующем механизме при испытаниях электрических цепей экспериментальным методом.

Данная конструкция ИМ позволяет регулировать скорость замыкания контактов. Отклонение пластины *d* прямо пропорционально скорости замыкания проволоки с диском за счет увеличения силы противодействия в пластине при большем отклонении.

Длительность разрядов замыкания является максимальной при низкой скорости замыкания контактов.

Схема регистрации экспериментальных зависимостей переходных процессов *RC*, *RLC* цепей при замыкании (рис. 2) включает в себя:

– блок питания постоянного тока с регулируемым и стабилизированным выходным напряжением (БП);

– токоограничительный резистор *R*1, исключающий влияние энергии БП в цепь разряда;

– исследуемую *RLC* цепь с элементами *C*1, *L*1, *R*2;

– кнопку *S*1, позволяющую исследовать как *RLC,* так и *RC* цепи;

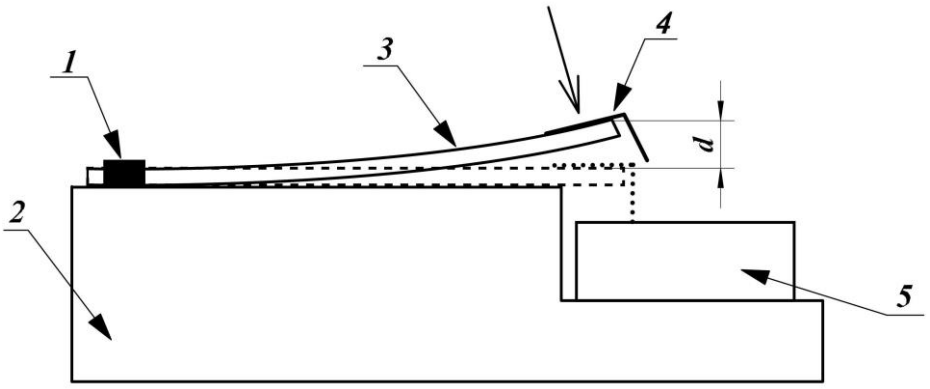


Рис. 1. Искрообразующий механизм разрядов замыкания

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

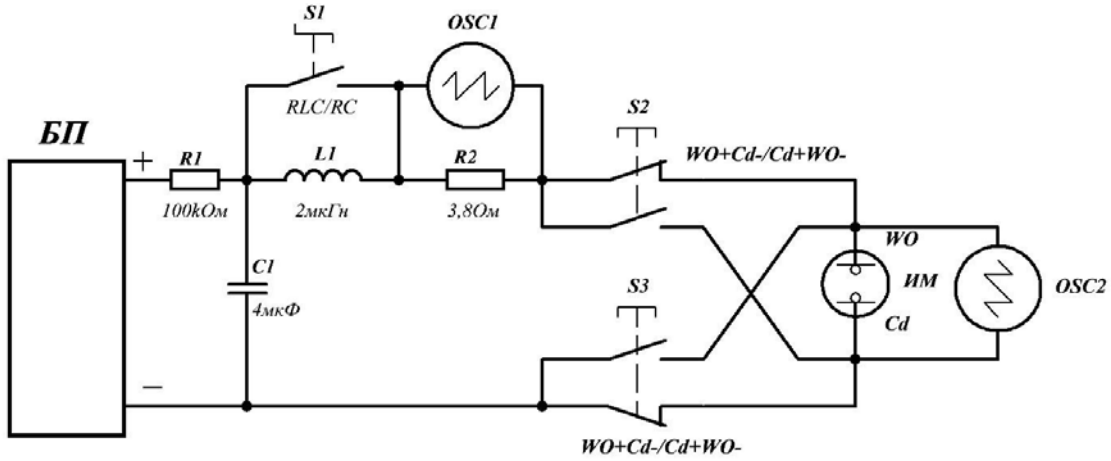


Рис. 2. Схема регистрации экспериментальных зависимостей переходных процессов *RC*, *RLC* цепей при замыкании

– кнопки *S*2, *S*3, позволяющие производить смену полярности напряжения на элементы ИМ: вольфрамовую проволоку (*WO*) и кадмиевый диск (*Cd*);

– искрообразующий механизм ИМ;

– цифровой запоминающий осциллограф с каналами 1 (*OSC*1) и 2 (*OSC*2) соответственно.

С целью исключения влияния емкости и индуктивности цепи экспериментальные исследования зависимости формирования напряжения на разряде от времени проводились на омической цепи при разных напряжениях цепи 30 В, 50 В, 70 В с учетом рекомендаций [9] по выбору оптимальной полярности.

На рис. 3 и 4 приведены по пять снятых произвольно экспериментальных зависимостей напряжения на разряде *Up*1…*Up*5 и тока разряда *Ip*1…*Ip*5 от времени *T* при замыкании омической цепи с параметрами: *R*2=3,8 Ом, *L*1=0 мкГн, *C*1=0 мкФ, $U_{БП}$=30 В с полярностью *WO*+*Cd*-.

С помощью пакета MathCAD рассчитаны и показаны на данных рисунках средние значения данных зависимостей *Up_cp*, *Ip_cp* по формулам (1), (2) соответственно.

$$Up_cp_i = \frac{Up1_i + Up2_i + Up3_i + Up4_i + Up5_i}{5}, \quad (1)$$

где Up_cp_i – среднее значение напряжения на разряде, В; i – номер значения в массивах данных в диапазоне от 1 до N; N – общее количество значений в массивах; $Up1_i…Up5_i$ – мгновенные значения напряжений на разряде, В.

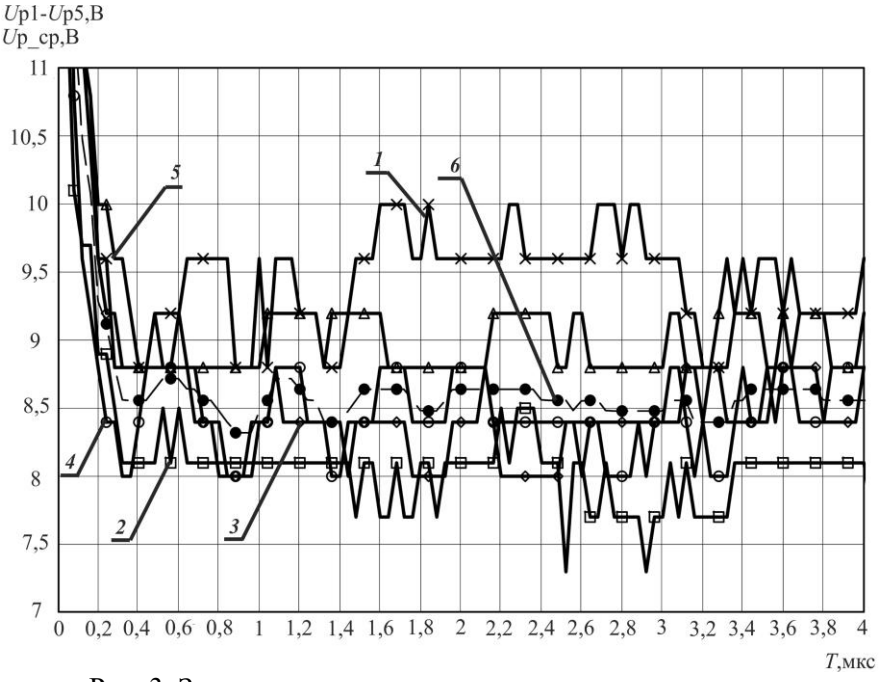


Рис. 3. Зависимости напряжения на разряде от времени:
1 – *Up*1, В; *2* – *Up*2, В; *3* – *Up*3, В; *4* – *Up*4, В; *5* – *Up*5, В; *6* – *Up_cp*, В

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

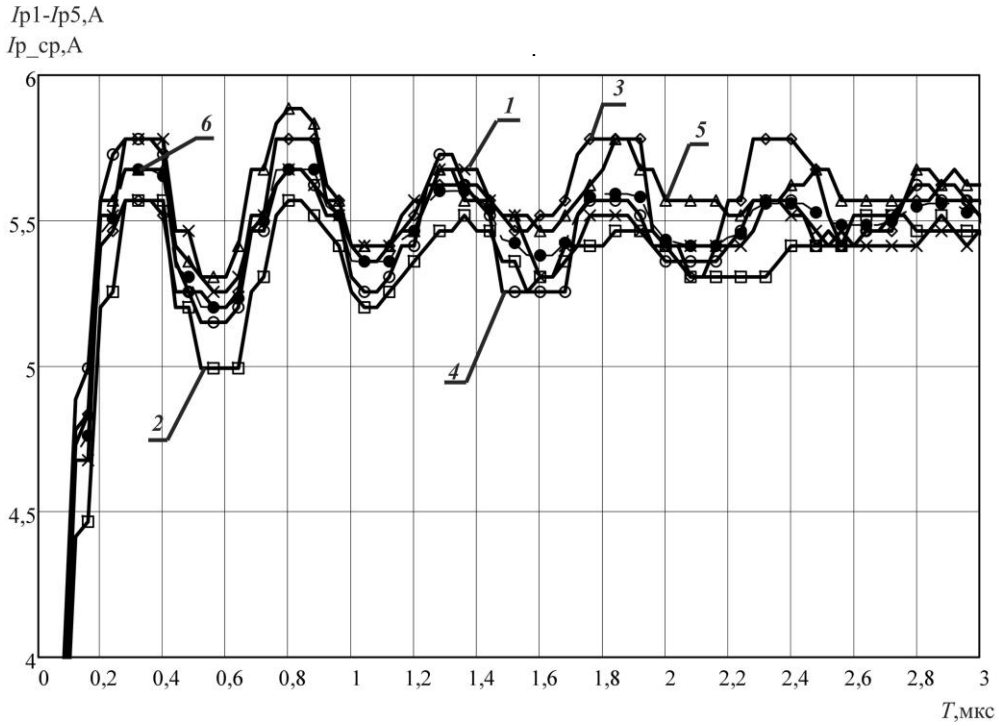


Рис. 4. Зависимости тока разряда от времени:
*1 – Ip*1, А; *2 – Ip*2, А; *3 – Ip*3, А; *4 – Ip*4, А; *5 – Ip*5, А; *6 – Ip_cp,* А

$$Ip_c_i = \frac{Ip1_i + Ip2_i + Ip3_i + Ip4_i + Ip5_i}{5}, \quad (2)$$

где Ip_cp_i – среднее значение напряжения разряда, А; $Ip1_i ... Ip5_i$ – мгновенные значения токов разряда, А.

Анализ аналогичных экспериментальных исследований омической цепи при напряжениях $U_{БП}$=50 В и 70 В показал отсутствие зависимости уровня напряжения на разряде от напряжения цепи.

Время достижения 95 % от установившихся значений напряжения (кривая 6, см. рис. 3) и тока разряда (кривая 6, см. рис. 4) составляет 0,2…0,3 мкс. Следовательно, учитывая экспоненциальный закон изменения напряжения, постоянная времени установления напряжения на разряде τ составляет 67…100 нс. Причем значение τ не зависит от напряжения цепи, что подтверждено экспериментально аналогичными исследованиями при напряжениях 50 В и 70 В.

Анализ зависимостей (см. рис. 3) дает основание предполагать, что изменение напряжения разряда во времени подчиняется экспоненциальному закону:

$$Up(T) = ae^{bT} + c. \quad (3)$$

С помощью встроенных функций пакета MathCAD массив усредненных значений напряжения на разряде *Up_cp*, аппроксимирован с помощью экспоненциальной регрессии вида (3). Найдены коэффициенты аппроксимации: a=21 В; b=-34 мкс$^{-1}$; c=8,9 В и оценен коэффициент корреляции: 0,96. Листинг программы приведен на рис. 5.

Усовершенствованная математическая модель разряда емкостной искробезопасной цепи основана на изменении сопротивления разряда во времени $Rp(T)$ по экспоненциальному закону (4) и на постоянстве напряжения на разряде в установившемся режиме – 8,9 В.

$$Rp(T) = \frac{(U_{БП} - 8{,}9)e^{-34\times10^6 T} + 8{,}9}{Ip(T)}, \quad (4)$$

где $Rp(T)$ – мгновенное значение сопротивления разряда, Ом; $U_{БП}$ – напряжение цепи, В; $Ip(T)$ – мгновенное значение тока в разряде, А; T – время, с.

Основные элементы и соотношения компьютерного моделирования разряда емкостной искробезопасной цепи в пакете MicroCAP приведены на рис. 6.

Ключ *SW*2 в исходном состоянии разомкнут, что обеспечивает заряд конденсатора *C*1 до напряжения источника питания *V*1. Переходный процесс запускается в момент замыкания ключа (через 10 мкс, рис. 6). В цепи разряда конденсатора *C*1=4 мкФ присутствуют сопротивление *R*3=3,8 Ом и индуктивность, например, *L*1=2 мкГн.

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

Экспоненциальная регрессия f (x) =a*e^bx+c:

$$S := \text{expfit}\left[T, Up_cp, \begin{pmatrix} 21 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}\right]$$

Нахождение коэффициентов a, b, c:

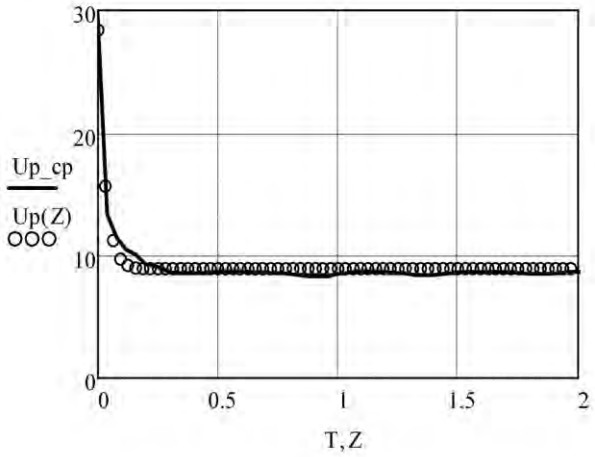
$$S = \begin{pmatrix} 20.97 \\ -33.983 \\ 8.896 \end{pmatrix}$$

Полученная функция:

$$Up(T) := 21 \cdot e^{-34T} + 8.9$$

Формирование массива времени
с шагом, меньшим, чем для массива T:

$$Z := \frac{\max(T) - \min(T)}{10000}, 0.01 .. \max(T)$$

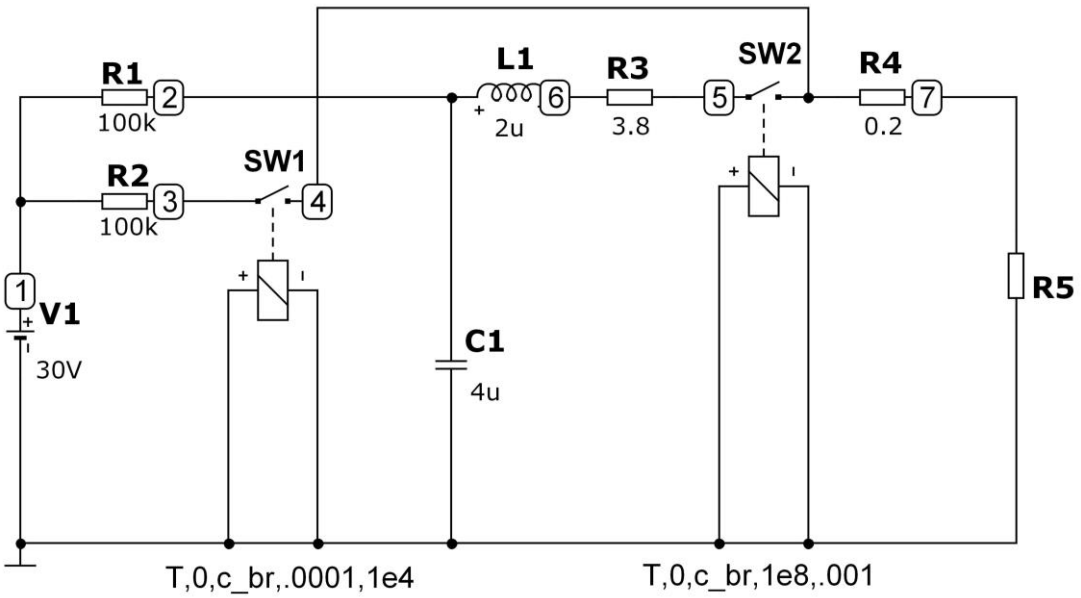


Проверка правильности аппроксимации
с помощью коэффициента корреляции

$$\text{corr}\left(\overrightarrow{Up(T)}, Up_cp\right) = 0.96$$

Рис. 5. Листинг программы аппроксимации напряжения на разряде
с помощью экспоненциальной регрессии

```
.OPTIONS ITL4=50
.define PD if(abs(I(R5))<500m OR T<c_br,0,I(R5)*V(R5))
.define Wr SD(PD)
.DEFINE c_br 10u
.MODEL S1 VSWITCH (RON=0.01)
```



R5: if(T<c_br, 1e10,((v(v1)-8.9)*exp(-34e6*(T-c_br))+8.9)/I(R5))

Рис. 6. Моделирование разряда емкостной искробезопасной цепи

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

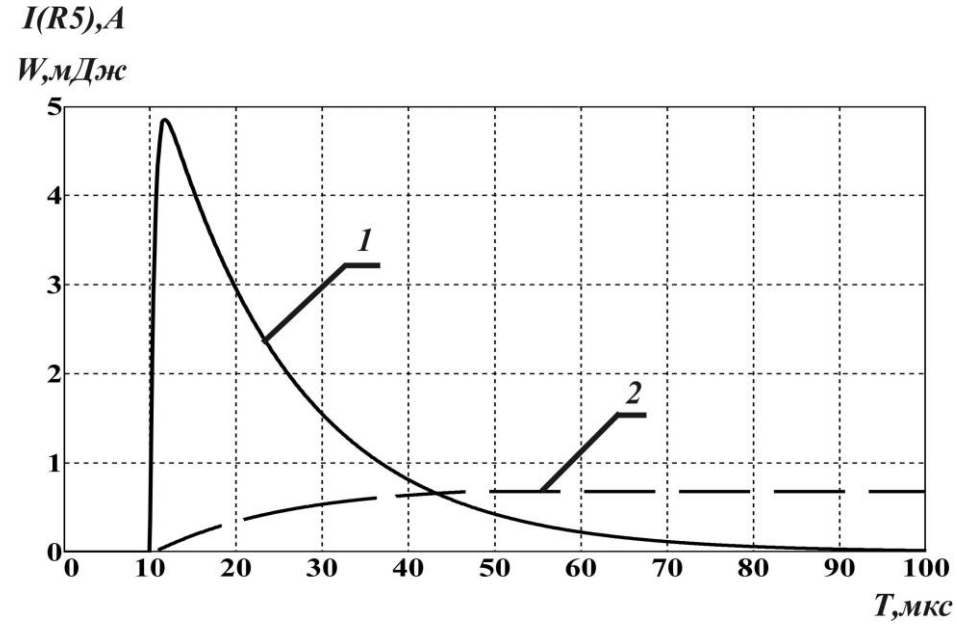
Сопротивление $R1$=100 кОм ограничивает ток источника питания $V1$. Ключ $SW1$ в исходном состоянии замкнут, что обеспечивает наличие напряжения холостого хода источника питания $V1$ на модели разряда перед запуском переходного процесса. Резистор $R4$ определяет сопротивление проводов, выводов элементов и т.д. Модель $R5$ показывает изменение во времени сопротивления разрядного промежутка (4), которое, в свою очередь, зависит от параметров разрядного контура.

По результатам расчета переходных процессов схемы, приведенной на рис. 6, построены зависимости основных параметров разряда замыкания (рис. 7) от времени.

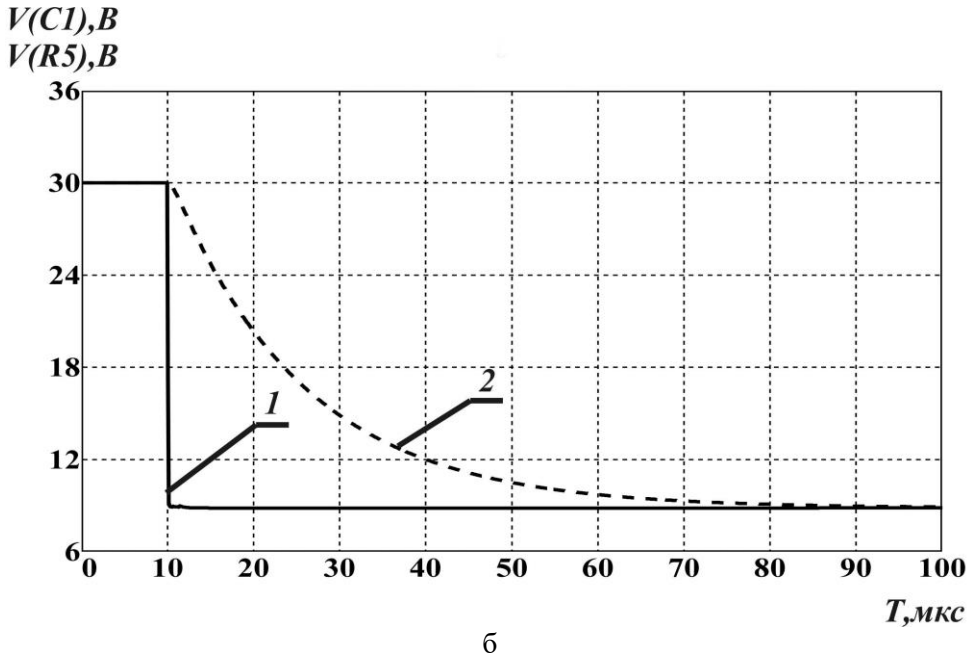
На рис. 7а $I(R5)$ – ток разряда через резистор $R5$, А (кривая 1); W – энергия разряда, мДж (кривая 2). На рис. 7б $V(R5)$ – напряжения на разряде (кривая 1), В; $V(C1)$ – напряжение на конденсаторе $C1$ кривая 2), В; T – время, мкс.

Начальное напряжение на разряде падает от значения напряжения источника $V1$ (см. рис. 6) до установившегося напряжения 8,9 В по экспоненте с постоянной времени 29 нс (кривая 1, рис. 7б). Подсчет энергии W осуществляется непрерывно (кривая 2, рис. 7а) до значения тока разряда $I(R5)$, равного 500 мА.

Расчет времени разряда рекомендуется осуществлять, измеряя относительное время всплеска кривой $I(R5)$ между началом ее роста и величиной тока обрыва разряда (обычно принимается в диапазоне 3…20 мА).



а



б

Рис. 7. Зависимости основных параметров разряда замыкания от времени

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

Табл. 1. Расчетные и экспериментальные данные разряда

E, В	*C*1, мкФ	*L*1, мкГн	Экспериментальные кривые			Разработанная модель			Модель [3]		
			W, мкДж	*Tp*, мкс	*I*max, А	*W*, мкДж	*Tp*, мкс	*I*max, А	*W*, мкДж	*Tp*, мкс	*I*max, А
30	4	0	715	39	5,1	680	38	5,3	745	36	4,8
50	4	0	1430	49	10	1397	48,3	10,4	1619	47,5	9,8
70	4	0	2150	55	15,3	2117	54,7	15,4	2493	54	14,8
30	4	2	680	39	5	680	37,6	4,9	748	35,9	4,4
50	4	2	1428	49,3	9,2	1390	47,8	9,4	1623	47	8,9
70	4	2	2150	55	14	2100	54	14	2498	53,4	13,5

Правомерность использования усовершенствованной математической модели доказывается сопоставлением расчетных и экспериментальных значений энергии разряда *W*, продолжительности разряда *Tp* и максимального тока разряда *I*max при токе обрыва искры 0,5 А и *R*3=3,8 Ом (табл. 1).

Выводы

Разработана усовершенствованная математическая модель разряда емкостной искробезопасной цепи, обеспечивающая погрешность результатов моделирования и экспериментальных данных не более 5 %. При этом погрешность в определении параметров разряда путем моделирования [3] и эксперимента достигает 16…20 %. Все это характеризует усовершенствованную модель как более точную при оценке искробезопасности расчетными методами.

Установившееся значение напряжения на разряде в усовершенствованной математической модели уточнено экспериментально и принято равным 8,9 В, что не противоречит результатам ранее проведенных исследований аналогичной величины для разрядов замыкания в емкостной цепи для полярности *WO+Cd-*.

Анализ результатов экспериментальных исследований омической цепи при разных напряжениях цепи показал отсутствие зависимости уровня напряжения на разряде, а также времени установления напряжения на разряде от напряжения цепи.

Постоянная времени установления напряжения на разряде в усовершенствованной математической модели уточнена экспериментально и принята равной 29 нс. При этом обеспечивается условие выделения в разряде всей энергии, которая была накоплена в конденсаторе.

Список литературы

1. ГОСТ 22782.5-78. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь». Технические требования и методы испытаний. – Введ. с 01.01.80. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – С. 24-28.
2. ГОСТ 31610.11-2014 (IEC 60079-11:2011). Взрывоопасные среды. Часть 11. Оборудование с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь «i». – Введ. с 17.06.2015. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2016. – С. 47-50.
3. Бершадский, И.А. Тестирование метода бескамерной тепловой оценки искробезопасности схемы источника питания / Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. научных трудов УкрНИИВЭ. – Донецк, 2011. – С. 230-240.
4. Диденко, В.П. Расчетная оценка искробезопасности емкостных цепей // Сб. научных трудов УкрНИИВЭ «Взрывозащищенное электрооборудование». – Донецк: УкрНИИВЭ, 2009. – С. 258-266.
5. ГОСТ Р 51330.10-99 (ГОСТ Р 51330.10-99). Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i». – Введ. с 01.01.2001. – М.: Госстандарт России, 2000. – С. 48-52.
6. ГОСТ Р 51330.10-99 (ГОСТ Р 51330.10-99). Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i». – Введ. с 01.01.2001. – М.: Госстандарт России, 2000. – С. 54.
7. Ерыгин, А.Т. Методы оценки искробезопасности электрических цепей /А.Т. Ерыгин, А.Л. Трембицкий, В.П. Яковлев. – М.: Наука, 1984. – С. 170-174.
8. Диденко, В.П. Современные подходы к оценке и обеспечению искробезопасности электрических цепей / Уголь Украины. – 2007. – №9. – С. 39-42.
9. Гладков, А.Ю. Экспериментальные исследования разряда короткого замыкания емкостной искробезопасной цепи // Сб. научных трудов НИИВЭ «Взрывозащищенное электрооборудование». – Донецк: НИИВЭ, 2017. – С. 154-164.
10. Коган, Э.Г. Способы и средства обеспечения искробезопасности рудничного электрооборудования. – М.: Недра. – 1988. – 101 с.

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

I.A. Bershadsky /Dr. Sci. (Eng.)/, S.V. Shlepnev /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
A.Yu. Gladkov
Makeyevka State Safety in Mines Research Institute (Makeyevka)

IMPROVING THE MATHEMATICAL DISCHARGE MODEL OF THE CAPACITIVE INTRINSICALLY SAFE CIRCUIT

Background. *The use of computational methods for assessing the intrinsic safety of capacitive circuits is the most preferable in relation to experimental ones. However, the parameters adopted in the mathematical model of the calculation method do not fully take into account the results of previous experimental studies. As a result, there is a significant discrepancy between the simulation results and experimental data. Thus, the objective of the paper is to develop an improved mathematical model of the discharge of capacitive intrinsically safe circuit, which reduces the discrepancy between the simulation results and experimental data obtained on the spark-forming mechanism with the help of modern recording devices.*
Materials and/or methods. *The results of experimental studies have become the basis for determining and refining the basic parameters of the improved mathematical model of the discharge with respect to the setting time constant of the voltage at the discharge τ and the set in voltage at the discharge.*
Results. *The experimental determination of the main parameters of the improved mathematical model of the discharge allowed significantly increasing the convergence of the simulation results with respect to the experimental data. The error of the simulation results of the improved model and experimental data is not more than 5 %. The error in determining the discharge parameters by modeling with an unspecified known computational method for estimating intrinsic safety and experiment reached 16…20 %.*
Conclusion. *Application of the improved mathematical discharge model of a capacitive electric circuit increases the accuracy of the known calculation method of assessment of its intrinsic safety.*

Keywords: *calculation methods of intrinsic safety assessment, voltage at discharge, energy of discharge, discharge duration, mathematical model of the discharge.*

Сведения об авторах
И.А. Бершадский
SPIN-код: 4772-3504
Телефон: +380 (50) 212-20-15
Эл. почта: ibersh164@gmail.com
А.Ю. Гладков
Телефон: +380 (95) 366-02-33
Эл. почта: Gladkov555@rambler.ru
С.В. Шлепнёв
Телефон: +380 (50) 857-22-82
Эл. почта: shlepnev71@mail.ru

Статья поступила 11.01.2019 г.
© И.А. Бершадский, С.В. Шлепнёв, А.Ю. Гладков, 2019
Рецензент д.т.н., проф. Э.Г. Куренный

ТЕХНОПАРК
УНИВЕРСИТЕТСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 669.14

С.П. Еронько /д.т.н./, М.Ю. Ткачев /к.т.н./, П.М. Матеко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

СИСТЕМА МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ПОДАЧИ СТАРТОВОЙ СМЕСИ В КАНАЛ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША

На основании системного анализа преимуществ и недостатков известных конструкций систем механизированной подачи стартовой смеси в канал сталеразливочного ковша предложено новое решение, позволяющее сократить расход дорогостоящего огнеупорного материала и улучшить условия труда обслуживающего персонала. В лабораторных условиях на физической модели системы установлена точность позиционирования ее рабочего органа.

Ключевые слова: *разливочный ковш, выпускной канал, стартовая смесь, гибкий металлорукав, физическая модель, привод, мощность.*

Постановка проблемы

Во время подготовки сталеразливочного ковша к приему металла очередной плавки, как известно, необходимо при закрытом шиберном затворе заполнить полость расположенного над ним огнеупорного стакана специальной (стартовой) смесью – порошкообразным или мелкозернистым материалом, предотвращающим попадание в выпускной канал жидкой стали в начале ее слива из плавильного агрегата [1]. Благодаря особым свойствам стартовая смесь не спекается при температурах 1600…1650 °С, не смачивается жидкой сталью и обладает высокой текучестью, что обеспечивает ее незамедлительное высыпание из канала разливочного стакана при первом открывании шиберного затвора, т.е. позволяет начать разливку металла в штатном режиме [2…10].

Выполнение такой операции вручную при обслуживании сталеразливочных ковшей большой вместимости связано не только со значительными физическими нагрузками, но и с нахождением персонала в зоне действия высоких температур.

Анализ последних исследований и публикаций

Результаты выполненного за последние 15 лет патентного поиска показывают, что в ряде стран были признаны изобретениями порядка 10-ти устройств, предназначенных для механизированной подачи смеси в зону расположения гнездового блока (кирпича), центрирующего разливочный стакан в футеровке днища ковша [11…15]. Однако отсутствие в открытых литературных источниках информации о результатах промышленного применения запатентованных за рубежом систем подачи стартовой смеси при подготовке к разливке ковша, а также установленное влияние условий ковшовой подготовки и перелива металла в промежуточный ковш на стабильность процесса непрерывной разливки длинными сериями [16…18] свидетельствуют в пользу продолжения работ, связанных с созданием вспомогательного оборудования данного класса.

Цель (задачи) исследования

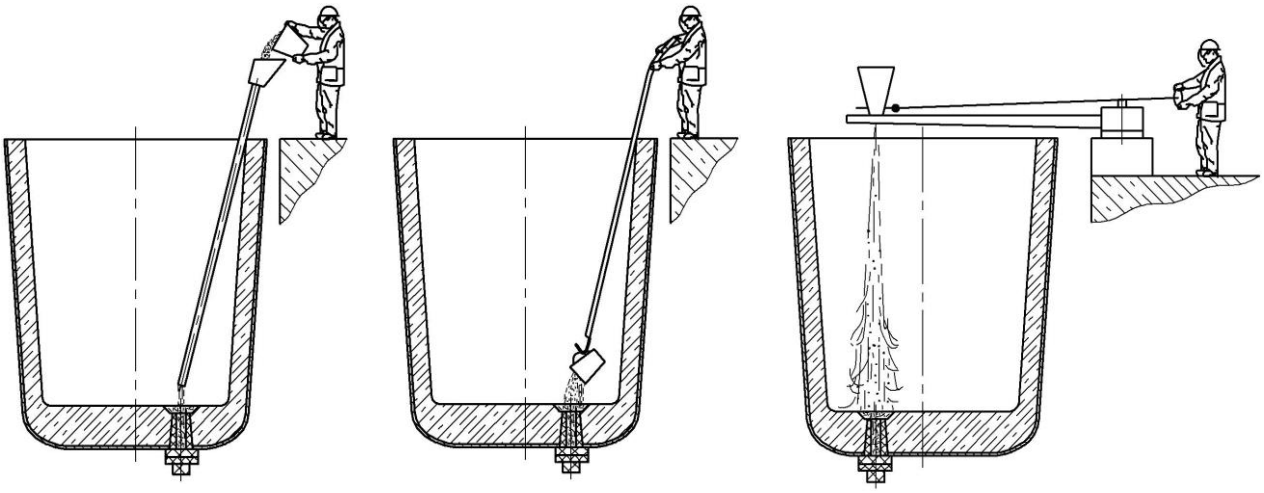
Целью настоящей работы является проверка на физической модели системы подачи стартовой смеси в канал сталеразливочного ковша правильности принятых при разработке новой конструкции технических решений, а также эмпирическая оценка эффективности ее функционирования в лабораторных условиях.

Основной материал исследования

В настоящее время подачу смеси в канал разливочного стакана, размещенного в гнездовом блоке футеровки донной части разогретого ковша, осуществляют либо с использованием трубы с внутренним диаметром 40…50 мм и длиной 4…6 м, нижний конец которой удерживают над входным отверстием канала стакана (рис. 1а) [19], либо с помощью специальной емкости, опускаемой в полость ковша и затем опрокидываемой посредством специальной штанги с крюком на конце (рис. 1б) [20].

Часть из технических решений, защищенных патентами на изобретения, предполагает осуществление подачи сыпучего материала в полость ковша из бункера (рис. 1в), установленного на поворотной консоли и имеющего в нижней части заслонку, при открытии которой стартовая смесь самотеком ссыпается сверху в место размещения разливочного стакана. При этом из-за воздействия конвективных потоков нагретого воздуха на вертикальную струю мелкодисперсного

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



а б в

Рис. 1. Способы подачи стартовой смеси в канал сталеразливочного ковша:
а – с помощью трубы; *б* – с помощью специальной емкости; *в* – самотеком из бункера

материала, истекающего из бункера с высоты нескольких метров, некоторая его часть рассеивается в полости ковша, что приводит к повышенному расходу стартовой смеси. С целью исключения негативного действия отмеченного фактора было предложено экранировать струю материала вертикальной цилиндрической камерой, предварительно устанавливаемой соосно с выпускным каналом ковша на футеровку его днища, что требовало использования кранового оборудования.

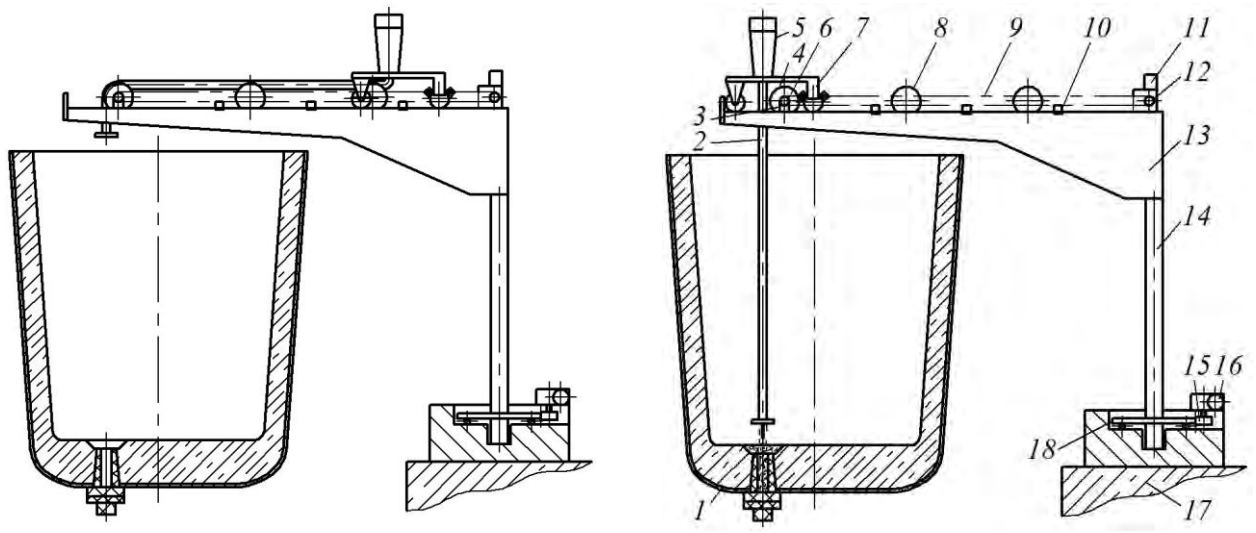
Необходимость задействования мостового крана возникает также при заполнении канала разливочного стакана ковша из подвесных бункеров, снабженных коллекторами, к нижней части которых прикреплены подвижные раструбы с установленными внутри них толкателями, приподнимающими при контакте с футеровкой днища конические заглушки в выпускных отверстиях бункеров для свободного высыпания стартовой смеси.

Для решения поставленной цели специалистами кафедры механического оборудования заводов черной металлургии Донецкого национального технического университета на основании результатов проведенного сопоставительного анализа достоинств и недостатков известных отечественных и зарубежных аналогов разработана усовершенствованная система механизированной подачи сыпучих материалов в выпускной канал разливочного ковша, схематично показанная на рис. 2. Она включает поворотную колонну 14, установленную на основании 17, и несущую консоль, выполненную из двух балок 13, жестко связанных поперечиной 3. Вдоль балок расположены направляющие для колесных пар подвижной тележки 7, поддерживающей бункер 5 с прикрепленным к его нижней части гибким металлорукавом 2. Привод перемещения тележки, состоящий из реверсивного червячного мотор-редуктора 11 с закрепленной на его выходном валу ведущей звездочкой 12, посредством пластичной цепи 9 передает через ведомую звездочку 6 вращение валу, установленному в подшипниковых опорах на поперечине 3. При этом пластичная цепь, обвивающая звездочки 6 и 12, своими концами связана с рамой тележки с помощью натяжных винтов и сообщает ей поступательное движение по направляющим вдоль консоли. Нижняя ветвь пластинчатой цепи 9 поддерживается несколькими скользунами 10, что уменьшает ее провисание.

Между подшипниковыми опорами на валу ведомой звездочки 6, в средней его части, жестко закреплен шкив 4, имеющий кольцевую канавку, форма которой соответствует половинному поперечному сечению металлорукава 2. Причем диаметр шкива по максимальному углублению продольной канавки равен диаметру ходового колеса тележки. Вдоль консольной балки в одной вертикальной плоскости с одинаковым шагом установлены несколько свободно вращающихся на осях направляющих роликов 8, препятствующих провисанию металлорукава при нахождении его в горизонтальном положении. Для поворота всей системы относительно сталеразливочного ковша 1 служит электромеханический привод, состоящий из червячного мотор-редуктора 16 с вертикальным валом, на хвостовике которого закреплена прямозубая шестерня 15, находящаяся в зацеплении с зубчатым венцом опорного диска 18, удерживающего поворотную колонну 14.

Система размещена на участке обслуживания сталеразливочных ковшей и функционирует следующим образом.

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



а б

Рис. 2. Конструкция системы механизированной подачи стартовой смеси в канал ковшового затвора:
а – положение элементов конструкции системы после поворота консоли в рабочее положение;
б – положение элементов конструкции системы в момент ссыпания стартовой смеси
в канал сталеразливочного ковша

Сталеразливочный ковш по завершении операций, связанных с осмотром и обслуживанием его разливочного узла (промывка кислородом выпускного канала для удаления застывших остатков шлака и металла, закрытия затвора), устанавливают краном в обозначенном месте возле поворотной колонны при отведенной в сторону консоли и находящейся в исходном положении тележки с заполненным бункером. Затем колонну поворачивают на требуемый угол и останавливают с таким расчетом, чтобы продольная ось симметрии консоли проходила над центром выпускного канала ковша (рис. 2а). Далее с помощью цепного привода тележку переводят в рабочую позицию. Во время поступательного движения тележки, благодаря равенству диаметров ее ходового колеса и шкива, в месте контакта с огибающим его металлорукавом, последний будет перемещаться синхронно с тележкой. В результате этого свободный конец металлорукава совершает вертикальное движение вниз и в момент перехода тележки в рабочую позицию окажется непосредственно над входным отверстием канала разливочного ковша.

При этом металлорукав выпрямится, образуя вертикальный подающий тракт (рис. 2б), по которому стартовая смесь, обладающая высокой текучестью, начнет ссыпаться из бункера в выпускной канал ковша, не подвергаясь воздействию воздушных конвективных потоков. Как только бункер опорожнится, тележку переводят в положение парковки, и металлорукав, связанный верхним концом с бункером, окажется уложенным на направляющие ролики. Перед началом транспортировки ковша краном к сталеплавильному агрегату для приема металла очередной плавки необходимо отвернуть консоль в исходное положение.

Проектированию промышленных образцов предложенной системы для обслуживания ковшей различной вместимости предшествовала разработка методики расчета конструктивных и энергосиловых параметров ее механизмов поворота колонны и перемещения тележки. При этом предварительно установили значения технологических нагрузок, действующих на исполнительные органы указанных механизмов, и с учетом размеров их конструктивных элементов получили теоретические зависимости, позволяющие определить мощность электрических приводов, обеспечивающих с заданной скоростью вращательное движение колонны и поступательное перемещение тележки, несущей расходный бункер со стартовой смесью [21].

Для экспериментальной проверки правильности принятых технических решений и корректности полученных теоретических зависимостей, с их использованием и с учетом рекомендаций работы [2], рассчитали и сконструировали лабораторный образец, который был изготовлен в масштабе, соответствующем размерам 8-тонного литейного ковша (рис. 3).

Согласно подготовленному плану эксперимента лабораторные исследования проводили в два этапа, предусматривающих оценку эффективности функционирования структурных механизмов предлагаемой системы и достигаемого при ее использовании показателя экономии стартовой смеси.

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



а б в

Рис. 3. Лабораторный образец системы механизированной подачи стартовой смеси в канал ковшового затвора:
а – в исходном положении; *б* – в конечном положении;
в – гнездовой блок модели ковша с заполненным смесью выпускным каналом

В ходе проводившихся тестовых испытаний осуществляли контроль точности позиционирования подающего металлорукава относительно центральной продольной оси модели выпускного канала сталеразливочного ковша, а также стабильности процесса его заполнения сыпучим материалом. При этом проверили функционирование механизмов поворота колонны и передвижения тележки и оценили вносимую ими долю погрешности позиционирования металлорукава относительно выпускного канала ковша. С этой целью предварительно выполнили настройку концевых выключателей, обеспечивающих остановку подвижных элементов исследуемой системы в нужных положениях относительно емкости, имитирующей верхнюю часть выпускного канала сталеразливочного ковша. Затем многократно осуществили перевод системы из исходного в рабочее положение и визуально контролировали процесс взаимодействия подвижно сопряженных деталей и точность подачи сыпучего материала в полость модели выпускного канала ковша. За абсолютную погрешность позиционирования принимали измеренное смещение оси металлорукава от оси выпускного канала.

Относительную погрешность позиционирования $\Delta_{отн}$ рассчитывали как отношение абсолютной погрешности $\Delta_{абс}$ к максимальному расстоянию $L_{макс}$ от оси ближайшей к основанию системы кинематической пары (т.е. поворотной колонны) до границы рабочей зоны:

$$\Delta_{отн} = \frac{\Delta_{абс}}{L_{макс}} \cdot 100\%.$$

Осредненное значение относительной погрешности позиционирования при моделировании определяли как среднеквадратическое по результатам 10-ти измерений. По полученным данным путем пересчета с использованием линейного масштаба лабораторного образца системы определили значения обеспечиваемых абсолютной и относительной погрешностей позиционирования промышленных систем, предназначенных для обслуживания сталеразливочных ковшей вместимостью 50, 100 и 250 т (табл. 1). Экспериментальная проверка функционирования механизмов предложенной системы механизированной подачи стартовой смеси подтвердила их работоспособность и обеспечение ими требуемой точности позиционирования металлорукава относительно выпускного канала разливочного ковша. Колебание металлорукава во время его опускания практически отсутствовало, что способствовало точному попаданию сыпучего материала в канал ковша.

Учитывая то, что одной из мотиваций для разработки усовершенствованной системы механизированной подачи стартовой смеси была необходимость устранения присущего известному прототипу недостатка, заключающегося в неравномерном расходе порошкообразного материала из-за его частичного развеивания в полости ковша под воздействием поднимающихся вверх потоков теплого воздуха, практический интерес представляет информация об исключаемых потерях смеси при использовании предложенной установки на ковшах различной вместимости.

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

Табл. 1. Расчетные параметры механизмов системы подачи стартовой смеси

Параметр	Вместимость ковша, т		
	50	100	250
Механизм поворота колонны			
скорость поворота, рад/с	0,26	0,26	0,26
мощность привода, кВт	0,3	0,5	1,0
абсолютная погрешность позиционирования, град.	0,3	0,4	0,5
относительная погрешность позиционирования, %	0,5	0,7	0,9
масса, кг	600	1200	2200
Механизм перемещения тележки			
скорость движения, м/с	0,3	0,4	0,5
мощность привода, кВт	0,12	0,15	0,2
абсолютная погрешность позиционирования, мм	10	15	20
относительная погрешность позиционирования, %	0,3	0,4	0,5
масса, кг	120	200	320

Табл. 2. Потери стартовой смеси при ее подаче свободной струей из расходного бункера в канал ковшового стакана

№ опыта	Высота расположения бункера над гнездовым блоком, м	Объем смеси в бункере перед высыпанием, $см^3$	Объем смеси в канале ковшового стакана, $см^3$	Относительные потери смеси, %
1	1,0	350	342	2,3
2			338	3,5
3			340	2,9
4	1,5	350	310	11,4
5			305	12,9
6			308	12,0
7	2,0	350	300	14,3
8			298	15,1
9			302	13,7

В связи с этим провели сопоставительный эксперимент, во время которого последовательно выполнили подачу одинакового объема стартовой смеси одного состава по двум вариантам: путем ее высыпания свободной струей из питающего бункера (рис. 1в) и подачей через гибкий направляющий рукав. При этом для создания поднимающегося вверх конвективного потока теплого воздуха в зоне расположения гнездового блока устанавливали мощный нагревательный элемент. Потери смеси определяли как разницу между объемом сыпучего материала, засыпаемого в расходный бункер, располагаемый на заданной высоте над гнездовым блоком ковша, и объемом материала, оказавшегося в канале ковшового стакана после пересыпания из бункера. В случае подачи стартовой смеси в канал разливочного стакана с использованием гибкого рукава потери материала полностью исключались (рис. 3в). Свободное ссыпание порошкообразного материала сопровождалось выделением из его конусообразной струи легковесных частиц под воздействием восходящего потока нагретого воздуха. Количество смеси, оседавшей за пределами периметра входного отверстия канала разливочного стакана, заметно зависело от высоты расположения расходного бункера, о чем свидетельствуют результаты серии замеров, приведенные в табл. 2.

На основании полученной информации можно сделать предположение о том, что потери стартовой смеси, подаваемой в канал разливочного стакана ковша большой вместимости свободной струей с высоты от 3 до 5 м, могут достигать 20 %.

Выводы

Внедрение предложенной разработки позволит не только улучшить условия труда персонала сталеплавильных цехов, занятого обслуживанием разливочных ковшей, но и повысить качество и сократить время выполнения необходимых операций, а также обеспечить рациональное использование дорогостоящих стартовых смесей.

Список литературы

1. Еронько, С.П. Разливка стали. Оборудование. Технология / С.П. Еронько, С.В. Быковских. – К.: Техніка, 2003. – 216 с.
2. Россихина, Г.С. Разработка составов стартовых смесей для шиберных затворов стале-

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

разливочных ковшей / Г.С. Россихина, Т.И. Золотарева // Материалы Международной конференции «Технологии и оборудование для производства огнеупоров. Использование новых видов огнеупорных изделий в металлургической промышленности», 15-16 февраля 2006 г., Москва. – М., 2006. – С. 73-78.
3. Вислогузова, Э.А. Стартовые смеси для шиберных затворов – необходимое условие производства качественного металла / Э.А. Вислогузова, Л.В. Серова, М.А. Хороших // Сталь. – 2008. – №6. – С. 33-34.
4. Земляной, К.Г. Стартовые смеси нового поколения / К.Г. Земляной, А.А. Куровский // Новые огнеупоры. – 2008. – №1. – С. 23-24.
5. Особенности новых разработок в области основных огнеупоров / Л.М. Аксельрод [и др.] // Новые огнеупоры. – 2008. – №9. – С. 23-28.
6. Голоперов, Ю.Л. Неформованные огнеупоры ООО «Метпромснаб» для металлургических предприятий России и СНГ / Ю.Л. Голоперов, Л.М. Антонов // Новые огнеупоры. – 2008. – №11. – С. 33-34.
7. Chromium-bearing starting mixture for filling the steel-discharge channel of casting ladles / L.M. Aksel'rod [et al.] // Steel in translation. – 2010. – No.3. – Vol.40. – P. 265-267.
8. Unmolded refractory material produced by OOO «Gruppa Magnezit» for filling the steel discharge channel of steel pouring ladles / L.M. Aksel'rod [et al.] // Refractories and industrial ceramics. – 2009. – No.6. – Vol.50. – P. 412-414.
9. Опыт применения неформованных огнеупоров в металлургических агрегатах сталеплавильного производства ОАО «Уральская Сталь» / А.М. Степашин [и др.] // Материалы Международной конференции «Технологии и оборудование для производства огнеупоров. Использование новых видов огнеупорных изделий в металлургической промышленности», 15-16 февраля 2006 г., Москва. – М., 2006. – С. 66-72.
10. Пат. 2381088 РФ, МПК B22D 41/46. Огнеупорная смесь для засыпки канала сталеразливочного ковша / В.В. Смертин [и др.]; ООО «Группа «Магнезит». – №2008139714/02; заявл. 06.10.2008; опубл. 10.02.2010.
11. Pat. 2015009249 Japan, B22D 41/46, 11/10. Filler casting apparatus and filler casting method / S. Norio, Y. Mitsuru; JFE steel corp. – No.2013-135282; filed 27.06.2013; published 19.01.2015.
12. Pat. 20110108970 Korea, B22D 41/46, 11/10. Apparatus and method for throwing filler into the nozzle of ladle / K.H. Gon, L.J. Hyeob; Hyundai steel CO. – No.10-2010-0028494; filed 30.03.2010; published 06.10.2011.
13. Pat. 2002361404 Japan, B22D 41/46, 11/10. Bucket for charging sand and method for filling packing sand / T. Shimazaki [et al.]; Kurosaki harima corp. nisshin steel CO LTD. – No.2001-170145; filed 05.06.2001; published 18.12.2002.
14. Pat. 2001353571 Japan, B22D 41/46, 11/10, F27D 3/14, C21C 5/46. Method for plugging molten metal discharging hole in molten metal vessel / K. Takahashi; Kawasaki steel CO. – No.2000-176227; filed 13.06.2000; published 25.12.2001.
15. Pat. 0002688 Germany, B22D 41/46. Method for optimising the opening rate of steel-casting ladles / M. Dislich, H. Liebig, S. Kirchhoff; Siemens AG, Schulz Egon. – No.PCT/EP99/04671; filed 06.07.1999; published 20.01.2000.
16. Штайнер, Б. Решения по автоматизации для шиберного ковшового затвора / Б. Штайнер, У. Труттман // Черные металлы. – 2009. – №5. – С. 28-35.
17. Современные системы повышения качества и разливки стали для металлургических и литейных производств / В.И. Золотухин [и др.] // Литье и металлургия. – 2012. – №3. – С. 222-227.
18. Смирнов, А.Н. Влияние условий ковшовой подготовки и перелива металла в промежуточный ковш на стабильность процесса непрерывной разливки / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.Н. Максаев // Черная металлургия. – 2016. – №1. – С. 51-56.
19. Куклев, А.В. Практика непрерывной разливки стали / А.В. Куклев, А.В. Лейтес. – М.: Металлургиздат, 2011. – 432 с.
20. Смирнов, А.Н. Непрерывная разливка стали / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
21. Разработка системы механизированной подачи стартовой смеси в канал ковшового затвора / С.П. Еронько [и др.] // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2017. – №3. – С. 54-59.

S.P. Eron'ko /Dr. Sci. (Eng.)/, M.Yu. Tkachev /Cand. Sci. (Eng.)/, P.M. Mateko
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE SYSTEM OF MECHANIZED FEEDING OF THE STARTING MIXTURE INTO THE LADLE CHANNEL

Background. *A comparative analysis of the advantages and disadvantages of the use of known meth-*

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

ods and mechanisms for supplying a special starting mixture to the channel of the steel ladle, used at the stage of its preparation for filling with melt, showed that the current use of special devices with manual drives and existing mechanisms entails an unreasonable increase in the consumption of the starting mixture due to the lack of the necessary accuracy of feeding to a given point, as well as the impact on the unshielded jet of air convective flows outgoing from the heated lining of the ladle.

Materials and/or methods. *The development of the system based on the fundamental principles of theoretical mechanics, the theory of mechanisms and machines, mechanics of liquids and gases, the theory of inventive problem solving (TIPS) and implemented with the use of methods of comparison, analysis, synthesis. Empirical studies of the parameters of the system carried out using methods of physical modeling through the laboratory experiments, followed by the use of the theory of errors and mathematical statistics in the processing of the results of the experiments.*

Results. *Design features and principle of operation developed by the authors of the system of mechanized feeding of the starting mixture into the ladle outlet channel, equipped with a gate valve, are the following. The starting mixture is fed by a flexible metal hose from a hopper placed on a trolley mounted on a rotary console and having the possibility of translational movement along it by means of a chain drive. The results of laboratory testing of the physical model of the system, as well as the method and the results of evaluation of the relative positioning error of the feed metal hose relative to the central longitudinal axis of the ladle outlet channel, confirm the performance of the main components and mechanisms of the new system which allows to automate this operation. The capacity values of the drives of the column rotation mechanism of the system for the feed conditions of the starting mixture into ladles with a capacity of 50, 100 and 250 tons respectively amounted to 0.3, 0.5, 1.0 kW, and the trolley movement mechanism – 0.12, 0.15, 0.2 kW.*

Conclusion. *The use of the system in the industry allows improving the conditions and increasing the safety of the personnel of steelmaking shops of metallurgical enterprises, reducing the consumption of expensive starting mixture, increasing the accuracy of its feed and remotely controlling this technological operation implemented thanks to the proposed new design at a qualitatively new technical level.*

Keywords*: steel ladle, outlet channel, starting mixture, flexible metal hose, physical model, drive, power.*

Сведения об авторах

С.П. Еронько
SPIN-код: 5911-0900
Author ID: 6701708282
ORCID iD: 0000-0002-5806-4723
Телефон: +380 (62) 301-08-39
Эл. почта: ersp@meta.ua

П.М. Матеко
Телефон: +380 (62) 301-08-35

М.Ю. Ткачев
SPIN-код: 9855-0447
Author ID: 57189358257
ORCID iD: 0000-0001-5795-9595
Телефон: +380 (95) 360-92-22
Эл. почта: mishel-tkachev@ya.ru

Статья поступила 22.01.2019 г.
© С.П. Еронько, М.Ю. Ткачев, П.М. Матеко, 2019
Рецензент д.т.н., проф. А.В. Яковченко



УДК 669.162

А.В. Кузин /к.н.т./, Н.С. Хлапонин /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ОЦЕНКА ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ РУДНОЙ ЧАСТИ ШИХТЫ ПРИ ВВЕДЕНИИ В НЕЕ КОКСОВОГО ОРЕШКА

Предложена усовершенствованная методика для оценки газопроницаемости рудной части шихты в доменной печи при введении в нее коксового орешка. Отличительной особенностью усовершенствованной методики является учет участия углерода коксового орешка в прямом восстановлении FeO. Показано, что газопроницаемость слоя смеси с учетом данного фактора будет ниже по сравнению с ранее полученными результатами.

***Ключевые слова**: скиповый кокс, коксовый орешек, газопроницаемость, прямое восстановление.*

Постановка проблемы

Как известно, доменная печь является агрегатом шахтного типа, работа которого немыслима без газодинамического процесса. Для улучшения газопроницаемости коксовой линзы перед загрузкой в печь кокс подвергается обязательному грохочению с выделением из него фракции менее 25…40 мм. Однако самым труднопроницаемым для газа материалом является железорудное сырье, что обуславливает принятие определенных решений для повышения ее газопроницаемости. Одним из возможных путей решения данной задачи является загрузка в доменную печь железорудного материала в смеси с коксовым орешком [1...3].

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время, в связи с увеличением расхода дополнительных видов топлива в доменную печь, роль кокса для обеспечения газопроницаемости столба шихты по высоте печи стала еще более значимой. В работах [4,5] показано, что использование в доменной печи скипового кокса фракции 40…60 и 60…80 мм является наиболее предпочтительным, поскольку такой кокс (по сравнению с коксом меньших размеров) может обеспечить хороший дренаж в горне и более лучшие показатели работы доменной печи. Проведенные экспериментальные плавки на доменных печах в ФРГ подтвердили, что для доменной печи целесообразно загружать кокс с небольшой долей класса больше 80 мм и меньше 40 мм при относительно бóльшем среднем размере кусков кокса [6,7]. Особенно жестче требование по фракционному составу скипового кокса стало в свете масштабного освоения технологии вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) в количестве более 150 кг/т чугуна: для улучшения дренажа горна среднее значение кусков кокса должно быть увеличено, а поступление в доменную печь фракции 25…40 мм со скиповым коксом снижено до 10 % [8]. Для достижения поставленной задачи фракцию более 80 мм выделяют из металлургического кокса с последующим ее додрабливанием, а в доменном цехе на нижних ситах коксового грохота устанавливают сита с размерами ячеек, как правило, 25…35 мм, реже до 40 мм [9].

Однако решение задачи по повышению среднего размера скипового кокса неизбежно приводит к увеличению отсева кокса и снижению степени использования металлургического кокса в доменной печи. Одним из вариантов решения данной задачи является выделение из отсева кокса фракции крупнее 10 (15) мм (т.н. коксовый орешек) и использование его в смеси с железорудной частью шихты. Данное обстоятельство обеспечивает не только максимальное использование металлургического кокса в доменной печи, но и повышение газопроницаемости железорудной части шихты. В работах [1,2] была предложена методика аналитической оценки газопроницаемости железорудной части шихты при введении в нее коксового орешка различной крупности.

По данным промышленных исследований, при обычной загрузке скипового кокса в самом низу шахты печи, т.е. на границе с распаром, общая степень восстановления окислов железа составляет 60…80 % [10]. В доменной печи восстановление Fe_2O_3, Fe_3O_4 и части FeO успевает завершиться непрямым путем за время опускания шихты от колошника до зон с температурами 950…1000 °С, где развивается прямое восстановление [11]. В печи прямое восстановление имеет место при условии протекания реакции $CO_2+C \rightarrow 2CO$, для чего в доменной печи необхо-

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

дима температура в основном выше 900…950 °С. По литературным данным температура выше 900 °С в шахте печи достигается в нижней ее части: это около 54 % от высоты шахты и части высоты колошника [11].

В технической литературе нет достаточных данных о доле участия углерода кокса и углерода коксового орешка в прямом восстановлении FeO. Лишь по редким публикациям можно качественно судить об этом показателе в нижней части шахты доменной печи. Так, по данным работы доменной печи № 3 Kakogawa (Kobe Steel, Япония) показано, что при замене части скипового кокса коксовым орешком фракции 8…20 мм, вводимым в железорудную часть в количестве около 10 % (расход кокса 312 кг/т чугуна, коксового орешка – 30 кг/т чугуна), средний диаметр кусков кокса на периферии по высоте печи от колошника до распара (т.е. примерно соответствует температуре 1000…1200 °С) уменьшился всего на 1 мм [12]. Это свидетельствует о том, что куски кокса в данном случае в прямом восстановлении оксидов железа принимают участие в меньшей мере, чем мелкие куски коксового орешка. Следовательно, логично предположить, что введение коксового орешка в железорудную часть шихты способствует снижению участия углерода кокса в реакции прямого восстановления FeO.

Ранее разработанная методика позволяет оценить изменение газопроницаемости столба шихты в «сухой» зоне доменной печи при смешивании коксового орешка с железорудным компонентом без учета участия углерода на прямое восстановление [1,2]. Ввиду возросшего интереса к данному вопросу была выполнена попытка оценки газопроницаемости железорудного компонента доменной шихты при введении в него коксового орешка с учетом участия углерода коксового орешка в прямом восстановлении.

Цель (задачи) исследования

Целью работы является оценка изменения газопроницаемости рудного слоя при введении в него коксового орешка с учетом протекания реакции прямого восстановления.

Основной материал исследования

Для оценки сопротивления рудного слоя газовому потоку при введении в него коксового орешка за основу была принята методика, опубликованная в работах [1,2]. Отличительной особенностью усовершенствованной методики от ранее предложенной является учет участия углерода коксового орешка в прямом восстановлении FeO.

В нижней части шахты доменной печи процесс прямого восстановления оксида железа может идти как за счет углерода кокса, так и за счет углерода коксового орешка.

Расчет показывает, что отношение удельной поверхности 100 кг кусков коксового орешка (средний диаметр от 15 до 25 мм) к удельной поверхности 100 кг кусков кокса (средний диаметр от 50 до 60 мм) будет находиться в диапазоне от 2 до 4. Это обстоятельство и лучший контакт железорудной шихты с коксовым орешком будет обеспечивать более быстрое реагирование углерода коксового орешка с оксидами железа и в итоге некоторое увеличение степени прямого восстановления в нижней части шахты печи.

Для качественной оценки изменения степени прямого восстановления были выполнены расчеты материально-теплового баланса фактической работы доменной плавки с различным расходом коксового орешка для условий доменной печи № 3 ArcelorMittal Bremen (Германия). Расчеты показали, что при практически постоянном суммарном расходе восстановителей на 1 т чугуна повышение расхода коксового орешка с 44 до 169 кг/т чугуна (с 11,4 до 55,5 %) способствует повышению степени прямого восстановления с 31,8 до 40,1 % (26,1 % отн.).

Ранее лабораторными опытами было показано [13], что при слоевой загрузке кокса и окатышей при введении 30 % коксового орешка в железорудный материал (температура восстановления 1000 °С, время выдержки пробы при достижении заданной температуры 150 минут) степень восстановления возрастала с 30,4 до 41,7 % (37,2 % отн.).

Сопоставление результатов промышленного и лабораторного исследований дает основание утверждать, что увеличение доли коксового орешка при прочих равных условиях будет способствовать увеличению степени прямого восстановления.

В температурных зонах 900…1000 °С и выше, коксовый орешек улучшает газопроницаемость смеси «рудный компонент – коксовый орешек» лишь в том случае, если имеется остаток коксового орешка после его участия в прямом восстановлении FeO. Участие коксового орешка в прямом восстановлении FeO приводит к уменьшению его массы и, как следствие, снижению его разрыхляющего воздействия.

Как было показано ранее [1,2], для оценки изменения перепада давления газа в рудной части без учета расходования углерода коксового орешка на прямое восстановление использовали выражение, %:

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

$$\Delta P_{без\ учета\ восст} = \frac{\Delta P_{смесь}}{\Delta P_{агл}} \cdot W_{агл}, \qquad (1)$$

а уменьшение сопротивления проходу газов в слое кокса считаем пропорционально уменьшению расхода кокса, %:

$$\Delta P_{кокс} = W_{кокс} \cdot \left(1 - \frac{Q_{кокс} - Q_{орешек}}{Q_{кокс}}\right), \qquad (2)$$

где $\Delta P_{агл}$, $\Delta P_{смесь}$ – изменение перепада давления газа в слое агломерата и в смеси коксового орешка с агломератом, %; $W_{агл}$, $W_{кокс}$ – долевое влияние агломерата и кокса соответственно в сопротивлении проходу газа в слое, %; $Q_{кокс}$ и $Q_{орешек}$ – расход кокса и коксового орешка в подачу, кг/подачу.

Тогда общее снижение перепада в подаче можно оценить путем сложения значений формул (1) и (2).

При учете участия углерода кокосового орешка в прямом восстановлении формулу (1) предлагается преобразовать. Есть два возможных варианта оценки изменения перепада давления газа в рудной части шихты при введении коксового орешка:

– фактический расход коксового орешка ниже необходимого количества для участия в прямом восстановлении;

– фактический расход коксового орешка выше необходимого количества для участия в прямом восстановлении.

При условии фактического расхода коксового орешка ниже необходимого для участия в прямом восстановлении изменение перепада давления газа предлагается оценить по формуле, %:

$$\Delta P_{с\ учётом\ восст} = 0{,}46 \cdot \Delta P_{без\ учёта\ восст} \cdot 1{,}1, \qquad (3)$$

где 0,46 – коэффициент учета неизменного состояния (неучастия в прямом восстановлении) орешка на участке от уровня засыпи шихты до распара; 1,1 – коэффициент учета остаточного разрыхляющего действия орешка в нижней части шахты (при температурах 900…1000 °С).

При условии фактического расхода коксового орешка выше необходимого для участия в прямом восстановлении изменение перепада давления газа предлагается оценить по формуле, %:

$$\Delta P_{с\ учётом\ восст} = 0{,}46 \cdot \Delta P_{без\ учёта\ восст} + \\ + 0{,}54 \cdot \left(\frac{Q_{КО\ факт} - Q_{КО\ необ}}{Q_{КО\ факт}}\right) \cdot \Delta P_{без\ учёта\ восст.}, \qquad (4)$$

где 0,54 – доля высоты от уровня засыпи шихты до распара печи, где происходит прямое восстановление FeO (температура 900…1000 °С); $Q_{КО\ факт}$ и $Q_{КО\ необ}$ – фактический и необходимый расход коксового орешка для прямого восстановления FeO в нижней части шахты по всей высоте слоя шихты до распара, кг/подачу.

Для определения изменения перепада давления газа в рудном слое и в слое подачи необходимо определить фактический и необходимый расход коксового орешка для прямого восстановления FeO в нижней части шахты по всей высоте слоя шихты до распара.

Определяем массу кислорода, вносимого оксидами железа всех железорудных материалов.

Далее оцениваем количество кислорода, связанного с оксидами железа, на уровне распара по формуле, кг/подачу:

$$O_{распар} = O_{приход} \cdot (1 - B), \qquad (5)$$

где B – вероятное изменение общей степени восстановления оксидов железа при введении коксового орешка, доля единицы.

Считаем, что оставшийся кислород в распаре будет находиться в виде FeO, следовательно, кг/подачу:

$$FeO_{распар} = \frac{72}{16} \cdot O_{распар}. \qquad (6)$$

В распаре, заплечиках и горне (температура 1000…1500 °С) масса восстановленного железа из FeO прямым путем составит, кг/подачу:

$$Fe_{прям\ II\ зона} = \frac{56}{72} \cdot FeO_{распар} \cdot r_d, \qquad (7)$$

где r_d – степень прямого восстановления оксидов железа с учетом введения коксового орешка в железорудную часть шихты, доля единицы.

Следовательно, до распара (температура 900…1000 °С) прямым путем восстанавливается Fe, кг/подачу:

$$Fe_{прям\ III\ зона} = Fe_{прям} - Fe_{прям\ II\ зона}, \qquad (8)$$

где $Fe_{прям}$ – общее количество железа, восстановленного в доменной печи за счет прямого восстановления, кг/подачу.

Масса FeO, восстанавливаемого прямым путем в нижней части шахты (температура 900…1000 °С), составит, кг/подачу:

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

$$FeO_{прям\ III\ зона} = \frac{72}{56} \cdot Fe_{прям\ III\ зона}. \qquad (9)$$

Масса FeO, восстанавливаемая прямым путем в нижней части шахты углеродом коксового орешка, составит, кг/подачу:

$$FeO_{прям\ III\ зона\ КО} = FeO_{прям\ III\ зона} \cdot R, \qquad (10)$$

где R – вероятная доля участия коксового орешка в прямом восстановлении в диапазоне температур 900…1000 °С, доля единицы.

Масса коксового орешка, необходимая для прямого восстановления FeO в нижней части шахты печи составит, кг/подачу:

$$Q_{КО\ необх} = \frac{12}{72} \cdot \frac{FeO_{прям\ III\ зона\ КО}}{C_{КО}}, \qquad (11)$$

где $C_{КО}$ – содержание углерода в коксовом орешке, доля единицы.

При фактическом расходе коксового орешка ниже необходимого расчет изменения перепада давления газа в рудном слое оценивается по формуле (3), иначе – по формуле (4).

По предложенной методике было оценено влияние коксового орешка на газопроницаемость столба шихты доменной печи в «сухой» зоне с учетом участия углерода коксового орешка в прямом восстановлении FeO, т.е. с учетом расходования коксового орешка на прямое восстановление.

В качестве исходных данных принята работа доменной печи № 3 Филиала № 2 Енакиевский металлургический завод ЗАО «Внешсервисторг» объемом 1719 м^3 (площадь колошника 37,4 м^2, высота шахты 17,8 м; полезная высота 28,5 м; высота колошника, заполненного материалами, 1,2 м); основность доменного шлака CaO/SiO_2=1,15; железорудная часть шихты – агломерат и окатыши; пылеугольное топливо не применялось; базовый состав доменной шихты примерно соответствует шихте в период работы печи в мае-июне 2012 г. с фактической производительностью 2829 т/сутки. Приход железа, FeO и Fe_2O_3 со всеми шихтовыми материалами составил соответственно 15662, 2555 и 19536 кг/подачу.

Общее количество кислорода, поступающее в доменную печь с оксидами железа, составило 6429 кг/подачу. В расчете принято, что коксовый орешек загружается в каждую подачу в агломерат. Для оценки изменения газопроницаемости слоя шихты в «сухой» зоне принимали средний размер агломерата равным 25 мм, а коксового орешка – 21,5 мм.

В расчетах приняты следующие допущения:

– увеличение коксового орешка на каждые 5 % будет способствовать повышению степени прямого восстановления оксидов железа на 6 % (отн.) [13];

– значение общей степени восстановления (непрямое + прямое) окислов железа на границе «низ шахты – распар» на каждые 5 % вводимого коксового орешка возрастает на 0,5 % (абс.).

С учетом формул (1) и (2) оценили перепад давления газа в рудном слое и подаче без учета участия углерода коксового орешка в реакциях прямого восстановления оксидов железа. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Ниже представлены результаты расчета по оценке перепада давления газа с учетом участия углерода коксового орешка в реакциях прямого восстановления оксидов железа. Тогда с учетом введения коксового орешка оценим показатели, рассчитанные по формулам (5)…(11) (табл. 2).

Оценим перепад давления газа в рудной части и в подаче с учетом расхода коксового орешка по формулам (3) или (4) (табл. 3).

На рис. 1 приведено изменение перепада давления газа с учетом и без учета расходования углерода коксового орешка в реакциях прямого восстановления оксидов железа. Как видно, линия изменения перепада давления газа при учете расходования углерода коксового орешка располагается ниже, чем без учета расходования углерода коксового орешка на прямое восстановление. Анализ также показывает, что при введении коксового орешка в железорудный слой в количестве 10…35 % от суммарного расхода загружаемого топлива разница перепада давления газа без учета и с учетом участия углерода коксового орешка в прямом восстановлении составляет 5…7,5 % (абс.).

Табл. 1. Оценка перепада давления газа в рудном слое и подаче без учета участия углерода коксового орешка в реакциях прямого восстановления

Показатели	Расход коксового орешка, %				
	0	5	10	20	30
Снижение перепада давления в рудном слое, %	0,0	11,9	19,5	28,2	32,7
Снижение перепада давления в коксовой линзе, %	0,0	0,8	1,6	3,1	4,7
Снижение перепада давления в подаче, %	0,0	12,7	21,1	31,3	37,4

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

Табл. 2. Оценка показателей, участвующих в определении перепада давления газа, с учетом участия углерода коксового орешка в реакциях прямого восстановления

Показатели	Расход коксового орешка, %				
	0	5	10	20	30
Количество кислорода, уходящее с газом до распара, кг/подачу	4500	4532	4565	4629	4693
Количество FeO, поступившее в нижнюю часть печи, кг/подачу	8681	8537	8388	8100	7812
Общее количество железа, восстановленное прямым путем из FeO, кг/подачу	6752	6640	6524	6300	6076
Количество железа, восстановленное прямым путем до распара, кг/подачу	3124	3339	3557	4003	4462
Количество FeO, восстановленное прямым путем в нижней части шахты углеродом коксового орешка, кг/подачу	4017	4078	4116	4118	4016
Масса коксового орешка, необходимая для прямого восстановления FeO в нижней части (до распара), кг/подачу	773	784	791	791	771

Табл. 3. Оценка перепада давления газа в рудном слое и подаче с учетом участия углерода коксового орешка в реакциях прямого восстановления

Показатели	Расход коксового орешка, %				
	0	5	10	20	30
Снижение перепада давления в рудном слое, %	0,0	6,0	12,0	21,5	27,7
Снижение перепада давления в коксовой линзе, %	0,0	0,8	1,6	3,1	4,7
Снижение перепада давления в подаче, %	0,0	6,8	13,6	24,6	32,4

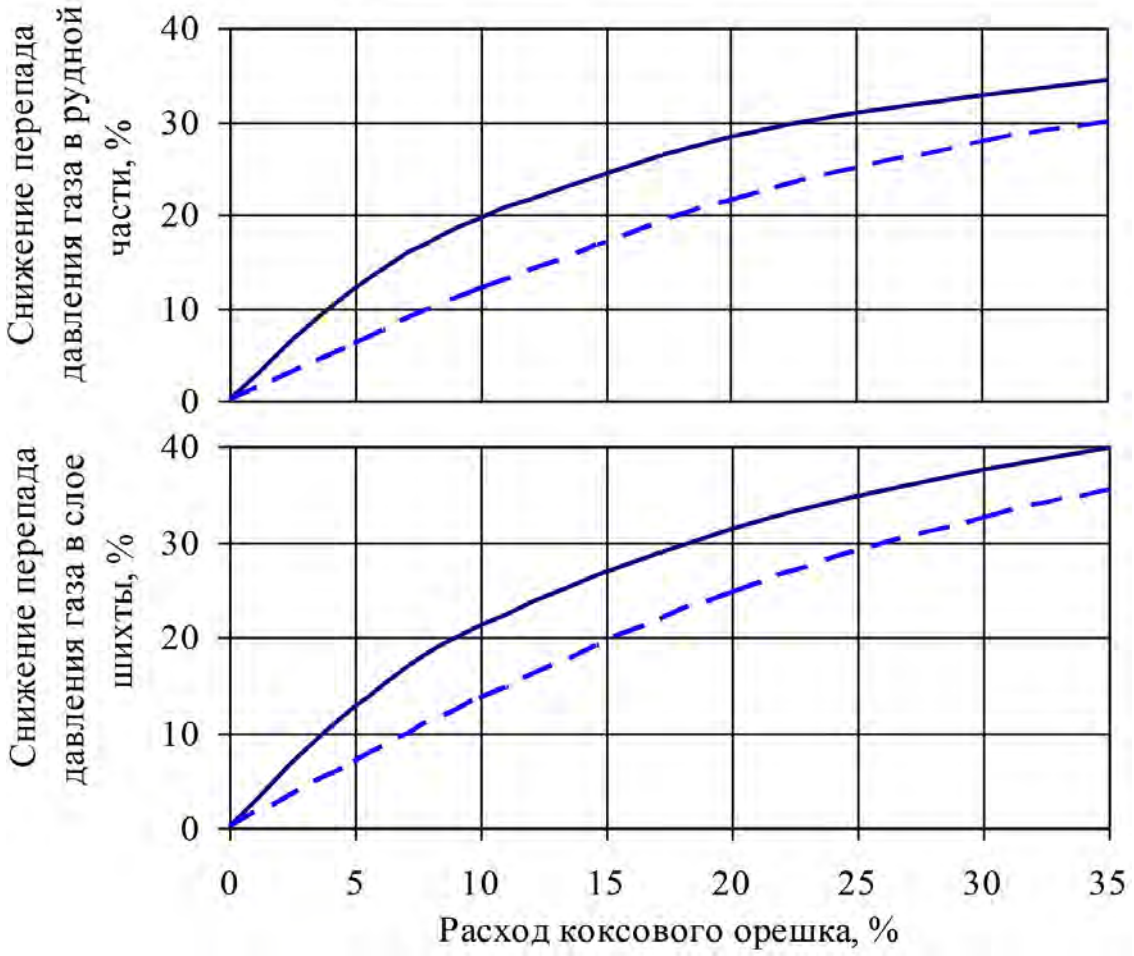


Рис. 1. Влияние введения коксового орешка в железорудный слой на изменение перепада давления газа без учета – *сплошная линия*, и с учетом – *прерывистая линия*, участия углерода коксового орешка в прямом восстановлении

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

Выводы

По литературным и экспериментальным данным определено, что в доменной печи коксовый орешек, загружаемый в рудную часть шихты, в значительной мере расходуется на прямое восстановление оксидов железа, т.е. часть коксового орешка не участвует в улучшении газопроницаемости железорудного слоя.

Разработана методика для аналитического исследования влияния газопроницаемости рудной части шихты при введении в нее коксового орешка с учетом протекания реакций прямого восстановления.

Показано, что с учетом расходования углерода коксового орешка на прямое восстановление перепад давления газа в рудном слое шихты меньше на 5…7,5 % (абс.) по сравнению с перепадом давления газа в рудном слое шихты без учета участия углерода в реакциях прямого восстановления.

Список литературы

1. Efficiency of Using Coke Fractions Smaller than 40 mm in a Blast Furnace / S.L. Yaroshevskii [et al.] // Metallurgist. – 2000. – Iss.11-12. – Vol.44. – P. 598-605.
2. Теория и практика подготовки металлургического кокса к доменной плавке / В.Г. Гусак [и др.]. – Киев: Наукова думка, 2011. – 216 с.
3. Sibagatullin, S.K. The rational mode of nut coke charging into the blast furnace by compact trough-type charging device / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, G.N. Logachev // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Iss.1-4. – Vol.86. – P. 531-537.
4. Остроухов, М.Я. Доменным печам – крупнокусковую и прочную шихту // Металлург. – 1967. – №4. – С. 10-11.
5. О влиянии на ход доменной печи изменения фракции кокса / И.И. Сагайдак [и др.] // Металлург. – 1968. – №7 – С. 5-7.
6. Тайхерт, Э. Влияние различной крупности кокса на режим работы доменной печи с горном диаметром 7,8 м / Э. Тайхерт, В.Н. Гупта // Черные металлы. – 1976. – №14-15. – С. 19-23.
7. Опыты по применению кокса различной крупности в доменных печах / В. Айзенхут [и др.] // Черные металлы. – 1979. – №2. – С. 25-30.
8. Влияние качества кокса и шихты на производительность доменной печи / Л. Бонте [и др.] // Черные металлы. – 2005. – №11. – С. 22-28.
9. Кузин, А.В. Опыт подготовки кокса к доменной плавке. Часть 1 / А.В. Кузин, Н.С. Хлапонин // Металлург. – 2019. – №1. – С. 10-16.
10. Буклан, И.З. Исследование процесса восстановления железорудных материалов в промышленной доменной печи: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.16.02 / Буклан Илья Зиновьевич. – Днепропетровск, 1971. – 28 с.
11. Ефименко, Г.Г. Металлургия чугуна / Г.Г. Ефименко, А.А. Гиммельфарб, В.Е. Левченко. – Киев: Вища школа, 1974. – 488 с.
12. Low Coke Rate Operation of Blast Furnace by Controlling Size of Coke Mixed Into Ore Layer / S. Muneyoshi [et al.] // Proceedings 5th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, 20-22.10.2009, Shanghai (China). – Shanghai: [б.и.], 2009. – P. 663-667.
13. Kuzin, A.V. Effect of Introducing Different Sizes of Nut Coke Into the Ore Layer on the Degree of Reduction of Iron Oxides // Metallurgist. – 2014. – Iss.9-10. – Vol.57. – P. 783-791.

A.V. Kuzin /Cand. Sci. (Eng.)/, N.S. Khlaponin /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

EVALUATION OF GAS PERMEABILITY OF THE ORE BURDEN WITH THE INTRODUCTION OF NUT COKE

Background. *As is known, the blast furnace is a mine-type unit, the operation of which is unthinkable without a gas-dynamic process. To improve the gas permeability of the coke oven lens before loading into the furnace, coke is subjected to mandatory screening with the release of a fraction of less than 25…40 mm. However, the most difficult-to-penetrate material for gas is iron ore, which causes the adoption of certain solutions to increase its gas permeability. One of the possible ways to solve this problem is to load iron ore materials mixed with a coke nut into the blast furnace.*

Materials and/or methods. *To assess the resistance of the gas flow when injected into the iron ore layer of the coke nut, a technique developed earlier was used. The analysis shows that the participation of coke nut carbon in direct reduction reactions will help to reduce the size and, as a consequence, reduce its loosening effect in the ore part. In this regard, the method of gas permeability assessment with the introduction of a coke nut improved. A distinctive feature of the improved technique*

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

from the previously developed one is the accounting of the participation of the nut coke in the direct recovery of FeO.

Results. *The change in the pressure drop of the gas in the iron ore layer with the introduction of a coke nut into it, taking into account and without taking into account the consumption of carbon of the coke nut in the reactions of direct reduction of iron oxides, estimated. Shown that the pressure drop in the mixture layer when taking into account the consumption of the coke nut will be less than without taking into account the consumption of the coke nut: with the introduction of the coke nut into the iron ore layer in the amount of 10..35% of the total consumption of the loaded fuel, the difference in the pressure of the gas without and taking into account the participation of the carbon of the coke nut in the direct formation will be 5…7.5 % (abs.).*

Conclusion. *A technique developed for the analytical study of the effect of gas permeability of the ore burden with the introduction of coke nut with consideration of reactions of direct reduction. Shown that taking into account expenditure of coke nut carbon on direct reduction the pressure drop of the gas in the layer of the charge is less than 5…7.5 % (abs.) in comparison with the gas pressure drop in the charge layer without taking into account the participation of carbon in direct reduction reactions.*

Keywords: *skip coke, coke nut, gas permeability, direct reduction.*

Сведения об авторах

А.В. Кузин
SPIN-код: 4470-0976
Author ID: 7102276525
Researcher ID: P-8105-2015
ORCID iD: 0000-0002-5369-433
Телефон: +380 (62) 301-08-42
Эл. почта: yarosh@fizmet.donntu.org

Н.С. Хлапонин
SPIN-код: 8570-2203
Author ID: 6507940511
Телефон: +380 (62) 301-08-42

Статья поступила 26.02.2019 г.
© А.В. Кузин, Н.С. Хлапонин, 2019
Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров



УДК 541.183:622.333

С.Л. Хилько /к.х.н./, М.И. Рогатко, Р.А. Макарова /к.х.н./, Р.Г. Семенова /к.х.н./
Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко (Донецк)
О.И. Невечеря
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» (Донецк)

АНТИРАДИКАЛЬНЫЕ И ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ РАЗНЫХ ПРИРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Определена антирадикальная активность фракций гуминовых и гиматомелановых кислот из разных образцов бурого угля Александрийского месторождения и из торфа Черкасского месторождения. Антирадикальную активность препаратов исследовали в реакции их взаимодействия со стабильным хромоген-радикалом 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом (ДФПГ) в диметилсульфоксиде и этаноле спектрофотометрическим методом. Показано, что в разных растворителях антирадикальная активность фракций гуминовых веществ коррелирует с количеством гидроксильных групп в структуре их макромолекул.

Ключевые слова: *гуминовые кислоты, гиматомелановые кислоты, антирадикальная активность, кислотно-основная реакция среды, 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил, УФ-спектроскопия, потенциометрия.*

Постановка проблемы

Гуминовые вещества (ГВ) относятся к биокосным телам, которые находятся на грани живой и неживой материи и создают благоприятные условия для развития жизни на Земле [1]. Они представляют собой обширный класс природных полиоксикарбоновых кислот, способных участвовать в окислительно-восстановительных, сорбционных процессах и проявляющих поверхностную и биологическую активность. Высокая реакционная способность гуминовых веществ обусловлена наличием в составе их макромолекул большого количества функциональных групп, прежде всего карбоксильных (COOH) и гидроксильных (OH).

Гуминовые вещества являются одной из наиболее химически активных частей бурого угля, торфа, почвенного гумуса, сланцев и донных отложений (сапропелей), что делает их уникальными объектами для решения химических задач различного плана. Препараты гуминовых веществ, как нативных, так и модифицированных, перспективны для применения в сельском хозяйстве, ветеринарии, медицине и технических направлениях. В этой связи получение препаратов с заданными свойствами на основе гуминовых веществ является актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций

Гуминовые вещества являются наиболее устойчивой формой органических соединений углерода вне живых организмов [2,3]. В отличие от процессов биосинтеза в живом организме образование гуминовых веществ не направляется генетическим кодом, а идет по принципу естественного отбора. Процесс трансформации органических остатков – одно из величайших изобретений природы. Если бы его не было, и процесс разложения биологических остатков приводил бы к полной минерализации их до оксидов (CO_2 и H_2O), то тогда не было бы основы для существования жизни на Земле [2,3]. В природе небольшая часть органических остатков минерализуется до CO_2 и H_2O, а бóльшая часть биологических остатков трансформируется в гуминовые вещества. При этом образуются устойчивые к биоразложению структуры, поскольку в природе нет ферментов, с помощью которых было бы возможно полное разложение биоматериала до углекислого газа и воды.

Наиболее реакционноспособными компонентами гуминовых веществ являются гуминовые (ГК) и гиматомелановые (ГМК) кислоты, которые в зависимости от природных источников отличаются элементным составом. Гиматомелановые кислоты – это спирторастворимые фракции гуминовых кислот. ГК и ГМК являются природными соединениями, которые представляют собой сложные органические структуры с конденсированными ароматическими ядрами, имеющими боковые цепи различной степени разветвления, в состав которых входят различные гидрофильные функциональные группы: карбоксильные, гидроксильные, хиноидные, аминогруппы [4…6]. Наличие этих функцио-

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

нальных групп в структуре макромолекул обуславливает биологическую активность гуминовых веществ и предполагает их способность к антиоксидантному и антирадикальному действию [7,8].

Известно, что гуминовые кислоты из торфа и бурого угля обладают выраженной биологической активностью (гепатопротекторные, антигипоксические, антитоксические и др. свойства) [9…13]. Гиматомелановые кислоты как один из важных компонентов гуминовых веществ также проявляют биологическую активность и могут найти применение в медицинской практике как противовоспалительные и иммунокоррегирующие средства [14].

Большое внимание для медицинских целей уделяется поиску природных источников биологически активных веществ с антиоксидантными и антирадикальными свойствами и разработке на их основе новых биодоступных лекарственных препаратов. Известно, что антиоксидантная и антирадикальная активности являются фармакологическими тестами для биологически активных веществ. Для технических целей важным является разработка эффективных антиоксидантов (например, для технических масел и смазок) и ингибиторов коррозии металлов из доступного и дешевого сырья.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является исследование антирадикальных и потенциометрических характеристик гуминовых и гиматомелановых кислот из разных природных источников (бурый уголь, торф) и определение влияния количества гидроксильных групп в структуре их макромолекул на антирадикальные характеристики.

Основной материал исследования

Гуминовые кислоты получали из аналитических проб бурого угля Александрийского месторождения однократной экстракцией 0,1 н раствором NaOH при соотношении твердой и жидкой фаз 1:8 и при двух температурах – 20 и 100 °С. Затем из «сырого» экстракта получали не растворимые в воде гуминовые кислоты осаждением 5 %-ным раствором HCl, который добавляли при постоянном перемешивании до pH 1…2. Выпавший осадок ГК отделяли от надосадочной жидкости центрифугированием. Осадок промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции среды (pH 6…7). Промытые гуминовые кислоты сушили при t=80 °С до постоянной массы. Растворы гуматов натрия (ГН) для исследования получали растворением промытых и сухих гуминовых кислот в 0,1 н растворе NaOH.

Гиматомелановые кислоты получали из гуминовых кислот однократной экстракцией этиловым спиртом при соотношении твердой и жидкой фаз 1:10, температуре 20 ºС и температуре кипения спирта 80 °С. Экстракцию проводили при перемешивании смеси компонентов в интенсивном турбулентном режиме с использованием механической мешалки при ω=900 об/мин в течение 2-х часов. Отделяли спирт упариванием, а остаток сушили в сушильном шкафу до постоянной массы. Затем весовым методом из сухих гиматомелановых кислот готовили растворы необходимых концентраций при растворении их в этиловом спирте или в 0,1 н растворе NaOH.

Для изучения антирадикальных и потенциометрических характеристик гуминовых веществ в работе использованы следующие образцы:

– смесь бурых углей из разных разрезов Александрийского месторождения. Температура экстракции 100 °С (образец 1);

– смесь бурых углей из разных разрезов Александрийского месторождения. Температура экстракции 20 °С (образец 2);

– смесь углей из разных разрезов Александрийского месторождения, технологически подготовленная к пылевидному сжиганию. Уголь высушен в атмосфере отходящих дымовых газов и измельчен в шаровой мельнице («сушонка») (образец 3);

– бурый уголь Морозовского разреза (Александрийское месторождение) (образец 4);

– торф Черкасского месторождения (образец 5).

При потенциометрическом кислотно-основном титровании отбирали аликвоту 1%-ного раствора гумата натрия объемом 0,25 мл и дистиллированной водой доводили объем до 50 мл. Концентрация гумата натрия в титруемом растворе составляла 0,05 %. Раствор 1 %-ного гумата натрия получали растворением навески сухих гуминовых кислот в 0,1 н растворе NaOH. Титрование раствора гуматов натрия осуществляли 0,1 н раствором HCl. После добавления каждой порции титранта (по 0,1 мл) систему перемешивали на магнитной мешалке в течение 2 мин. Точки эквивалентности определяли дифференциальным методом как максимумы на дифференциальных кривых: $\Delta pH/\Delta V=f(V_{HCl})$ [15].

Для количественной оценки антирадикальной активности (АРА) был применен один из наиболее популярных методов, основанный на реакции стабильного свободного радикала ДФПГ (2,2'–дифенил-1-пикрилгидразил), растворенного в этаноле или диметилсульфоксиде, с образцом антиоксиданта (АО=А-Н) по схеме [16]:

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

ДФПГ*+А-Н→ДФПГ-Н+А*.

За ходом реакции следили по изменению величины оптической плотности растворов методом спектрофотометрии. В результате восстановления ДФПГ антиоксидантом снижается интенсивно-фиолетовая окраска раствора ДФПГ в этаноле при λ=517 нм в видимой области спектра. При этом радикал ДФПГ, взаимодействуя с молекулой антиоксиданта, переходит в нерадикальную форму. Использовали растворы в этиловом спирте и диметилсульфоксиде.

Исследования были проведены на спектрофотометре Specord UV VIS при t=20 °С. Готовили растворы (C=1,0×10^{-4} М) ДФПГ фирмы Aldrich (ω=97 %) и серию растворов субстратов разной концентрации. Для изучения кинетики реакции в кювете толщиной 1 см смешивали 2,0 мл раствора ДФПГ и 0,5 мл каждого из растворов полученной серии субстратов; сразу же после смешивания регистрировали значения оптической плотности (А).

Характерные интегральные и дифференциальные кривые потенциометрического титрования растворов солей гуминовой кислоты, выделенной из бурого угля водным раствором щелочи при температуре кипения (100 °С) (образец 1), и гиматомелановых кислот, экстрагированных из этого образца гуминовых кислот этиловым спиртом при комнатной температуре (20 °С) и температуре кипения этанола (80 °С), приведены на рис. 1. Рассчитанные из данных потенциометрического титрования количества активных СООН- и ОН-групп в структуре макромолекул ГК и ГМК приведены в табл. 1.

Как следует из данных, приведенных в таблице, гиматомелановые кислоты содержат бо̀льшее количество гидроксильных групп, чем гуминовые кислоты, тогда как последние более обогащены карбоксильными группами. Эти результаты подтверждают представления о том, что гиматомелановые кислоты являются наиболее восстановленной фракцией гуминовых кислот [17].

На рис. 2 приведены характерные кинетические кривые расходования ДФПГ при взаимодействии с фракцией гуминовых кислот в растворах ДМСО, а на рис. 3 – зависимости остаточного содержания ДФПГ (% ДФПГ) через 5 минут реакции ГК с ДФПГ от концентрации субстрата для фракции ГК, выделенной при 100 ºС (образец 1). Линейный характер зависимостей $A/A_0=f(C_{ГВ})$ позволяет определять величины EC_{50} (effective concentration) концентраций субстратов, которые необходимы для уменьшения концентрации ДФПГ на 50 %.

На рис. 4 приведены кинетические кривые расходования ДФПГ в реакции с гуминовой кислотой, полученной экстракцией при 100 ºС из бурого угля Морозовского разреза, в растворе ДМСО (образец 4), а на рис. 5 – характерные кинетические кривые расходования ДФПГ в реакции с гиматомелановой кислотой, извлеченной этанолом при 20 ºС из гуминовой кислоты бурого угля (образец 2), в растворе C_2H_5OH.

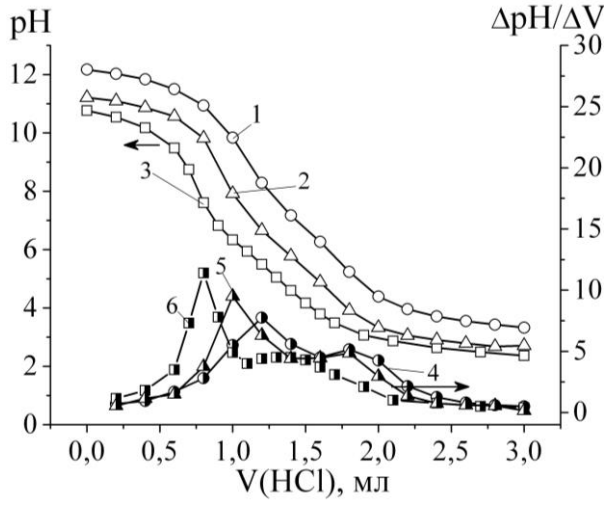


Рис. 1. Кривые потенциометрического титрования 0,05%-ных растворов солей гуминовой кислоты и гиматомелановых кислот, экстрагированных из этого образца ГК при двух температурах:
1, 2, 3 – интегральные кривые;
4, 5, 6 – дифференциальные кривые.
Температура экстракции ГК 100 °С; температура экстракции ГМК из ГК, °С: *2, 5* – 20; *3, 6* – 80

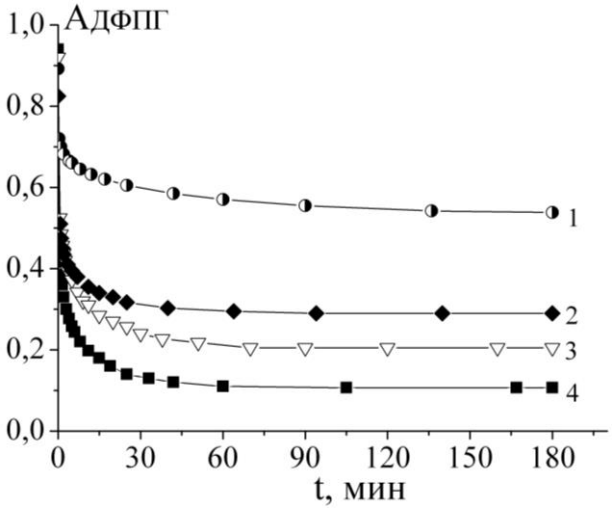


Рис. 2. Кинетические кривые расходования ДФПГ в реакции с гуминовой кислотой, полученной из образца бурого угля 1, экстракцией при 100 ºС, в растворе ДМСО, $C_{ГК}$, г/л:
1 – 0,0313; *2* – 0,0940; *3* – 0,1254; *4* – 0,1567

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

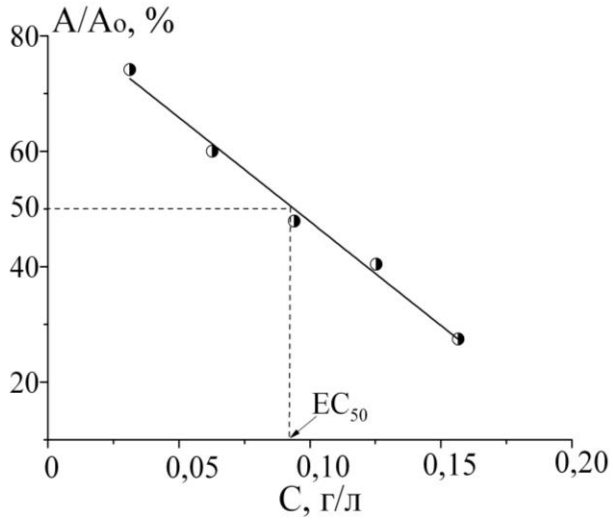


Рис. 3. Зависимость остаточного содержания ДФПГ от концентрации ГК, полученной экстракцией при 100 °С из бурого угля образца 1, в растворах ДМСО, *t*=5 мин

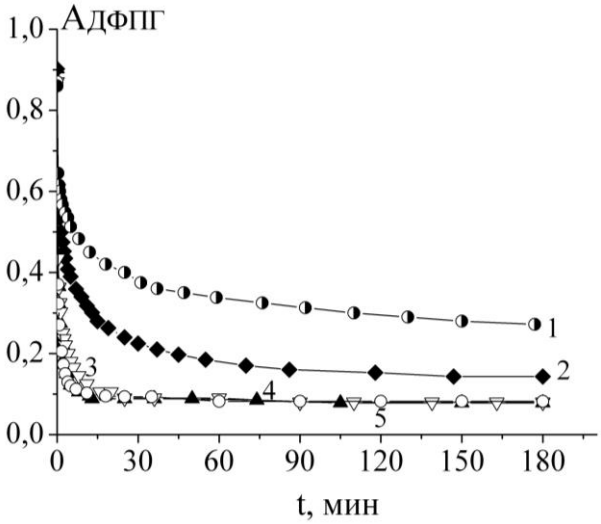


Рис. 4. Кинетические кривые расходования ДФПГ в реакции с гуминовой кислотой, полученной экстракцией при 100 ºС из бурого угля Морозовского разреза, в растворе ДМСО, $C_{ГК}$, г/л: *1* – 0,0314; *2* – 0,0628; *3* – 0,0942; *4* – 0,1256; *5* – 0,1428

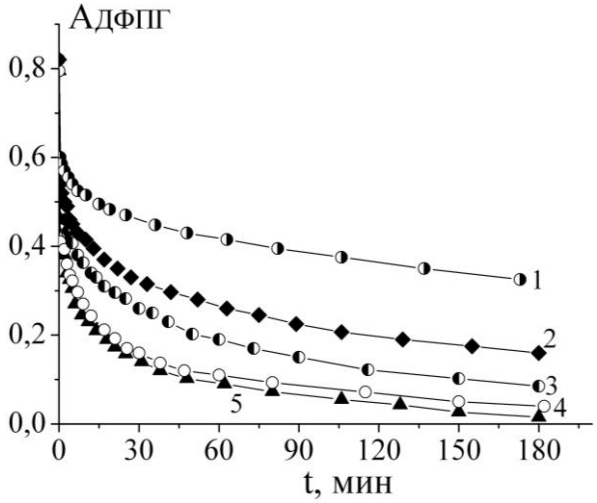


Рис. 5. Кинетические кривые расходования ДФПГ в реакции с ГМК, извлеченной этанолом при 20 ºС из гуминовой кислоты, полученной при 20 ºС из бурого угля образца 2, в растворе C_2H_5OH, $C_{ГМК}$, г/л: *1* – 0,0314; *2* – 0,0627; *3* – 0,0941; *4* – 0,1254; *5* – 0,1568

Как следует из рис. 1…5, концентрация ДФПГ существенно снижается в зависимости от времени процесса и роста концентрации ГК и ГМК в системе. Рассчитанные значения величины EC_{50} как характеристики антирадикальной активности фракций гуминовых и гиматомелановых кислот, полученных из разных образцов бурого угля и торфа, приведены в таблице. Чем меньше значение параметра EC_{50}, тем большей антирадикальной активностью обладает вещество.

При последовательных экстракциях ГК, сначала при 20 °С, а из остатка – при 100 °С, гуминовые кислоты содержат больше ОН-групп и меньше СООН-групп. В этом случае сначала при 20 °С экстрагируются «кислые» фракции с большим содержанием СООН-групп, а затем из остатка при температуре кипения уже выделяются менее «кислые» фракции с преимущественным содержанием ОН-групп. Как уже отмечалось в литературе, в зависимости от источника происхождения (бурый уголь, торф, сапропель, почва) гуминовые кислоты различаются по составу. Но диапазон вариаций атомных соотношений основных составляющих элементов (C, H, O, N) в пределах одного источника происхождения не столь уж широк [2,3,18]. Задачей исследований гуминовых соединений является выявление общих физико-химических свойств, характерных для этих соединений. Для гуминовых веществ из разных природных источников количественные характеристики варьируются в некотором диапазоне, но общие физико-химические свойства их при этом сохраняются.

Таким образом, полученные результаты согласуются с имеющимися в литературе сведениями о том, что в целом диапазон вариаций функционального состава гуминовых и гиматомелановых кислот из разных источников не слишком широк. Для бурого угля Александрийского месторождения и торфа Черкасского месторождения количество карбоксильных групп находится в пределах 2,4…3,2 мг-экв/г, а для гидроксильных групп – 2,4…3,6 мг-экв/г.

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

Табл. 1. Характеристики антирадикальной активности в разных растворителях и содержание активных функциональных групп в образцах гуминовых и гиматомелановых кислот из бурого угля и торфа

Образец ГК	Температура экстракции, °С	EC_{50}, г/л	Уравнение $A/A_0=f(C_{ГВ})$	R	[OH], мг-экв/г	[COOH], мг-экв/г
Гуминовые кислоты в ДМСО						
Образец 1	100	0,095	y=-366,2x+84,8	0,99	2,4	2,8
	Остаток после экстракции ГМК при 20	0,108	y=-406,0x+93,9	0,99	2,6	2,6
	Остаток после экстракции ГМК при 80	0,109	y=-423,7x+96,4	0,97	3,2	2,4
Образец 2	20	0,105	y=-290,8x+80,4	0,99	2,0	2,4
	100 после экстракции ГК при 20	0,094	y=-424,8x+89,9	0,98	3,2	3,2
Образец 3	100	0,126	y=-237,2x+79,8	0,95	3,0	3,4
	20	0,130	y=-335,6x+93,7	0,97	2,8	3,2
	100 после экстракции ГК при 20	0,060	y=-411,1x+74,5	0,98	3,4	2,8
Образец 4	100	0,046	y=-435,2x+69,9	0,97	3,4	3,0
	20	0,036	y=-435,2x+65,6	0,99	3,6	2,8
	100 после экстракции ГК при 20	0,038	y=-558,0x+71,3	0,96	3,6	2,8
Образец 5	100	0,112	y=-384,7x+93,0	0,96	2,6	2,4
Гиматомелановые кислоты в этаноле						
Образец 1	Экстракция ГМК при 80	0,089	y=-378,0x+83,6	0,99	3,2	2,4
	Экстракция ГМК при 20	0,082	y=-392,5x+82,1	0,97	3,2	3,2
	Экстракция ГМК при 80 после экстракции ГМК при 20	0,145	y=-262,3x+87,9	0,98	2,4	2,4
Образец 2	Экстракция ГМК при 80	0,112	y=-219,5x+74,6	0,98	3,0	2,8
Образец 3	Экстракция ГМК при 80	0,272	y=-103,8x+78,2	0,98	2,2	3,6
Образец 4	Экстракция ГМК при 80	0,059	y=-281,2x+66,6	0,98	3,6	3,2
Образец 5	Экстракция ГМК при 20	0,093	y=-221,1x+70,6	0,98	3,2	2,8

Наблюдается следующая тенденция: в разных растворителях антирадикальная активность фракций гуминовых и гиматомелановых кислот коррелирует с количеством гидроксильных групп в структуре их макромолекул. Максимальная антирадикальная активность выявлена для фракций гуминовых кислот, выделенных из бурого угля Морозовского разреза (образец 4), не подвергавшегося никаким технологическим воздействиям

Выводы

Методом потенциометрического титрования исследованы кислотно-основные свойства гуминовых и гиматомелановых кислот из мягкого, землистого бурого угля Александрийского месторождения и из торфа Черкасского месторождения. Показано, что диапазон вариаций функционального состава гуминовых и гиматомелановых кислот из разных источников не широк. Для карбоксильных групп диапазон варьирования находится в пределах 2,4…3,6 мг-экв/г, для гидроксильных групп – 2,0…3,6 мг-экв/г.

Определена антирадикальная активность фракций гуминовых и гиматомелановых кислот из разных образцов бурого угля Александрийского месторождения и из торфа Черкасского месторождения в диметилсульфоксиде и этаноле спектрофотометрическим методом. Показано, что в разных растворителях антирадикальная активность фракций гуминовых веществ коррелирует с количеством гидроксильных групп в структуре их макромолекул. Максимальная антирадикальная активность выявлена для фракций гуминовых кислот Морозовского разреза.

Список литературы

1. Вернадский, В.И. Биогеохимические очерки 1922 – 1932. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1940. – 250 с.
2. Орлов, Д.С. Гуминовые вещества в биосфере / Соросовский образовательный журнал. –

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

1997. – № 2. – С. 56-63.
3. Орлов, Д.С. Органическое вещество почв России / Почвоведение. – 1998. – №9. – С. 1049-1057.
4. Wershaw, R.L. Application of a membrane model to the sorptive interactions of humic substances / Environ. Health Perspect. – 1989. – Vol.83. – P. 191-203.
5. Pena-Mendes, E.M. Humic substances – compounds of still unknown structure: applications in agriculture, industry, environment, and biomedicine / E.M. Pena-Mendes, J. Havel, J. Patoska // J. Appl. Biomed. – 2005. – No.3. – P. 13-24.
6. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H+ -ATPase activity in maize roots / L.P. Canellas [et al.] // Plant Physiol. – 2002. – Vol.130. – P. 1951-1957.
7. Physicochemical characterization and antioxidant activity of humic acids isolated from peat of various origins / M.V. Zykova, I.A. Schepetkin, M.V. Belousov // Molecules. – 2018. – No.4. – Vol.23. – P. 1-15.
8. Long-term kinetics study and quantitative characterization of the antioxidant capacities of humic and humic-like substances / O.I. Klein [et al.] // Journal of Soils and Sediments. – 2018. – No.4. – Vol.18. – P. 1355-1364.
9. Гостищева, М.В. Химико-фармакологическое исследование нативных гуминовых кислот торфов Томской области: автореф. дис. … канд. фарм. наук: 15.00.02; 14.00.25 / Мария Владимировна Гостищева; Сибир. гос. ун-т. – Пермь, 2008. – 22 с.
10. Федько, И.В. К вопросу об использовании биологически активных гуминовых веществ в медицине / И.В. Федько, М.В. Гостищева, Р.Р. Исматова // Химия растительного сырья. – 2005. – №1. – С. 49-52.
11. Беркович, А.М. Применение гуминовых и гуминоподобных препаратов в ветеринарии и медицине / [Электронный ресурс]. – 2007. – 29 с. – Режим доступа: http://www.humi pharm.ru/research/prim.pdf
12. Полуянова, И.Е. Биологическая активность гуминовых веществ, получаемых из торфа, и возможности их использования в лечебной практике / Международные обзоры: клиническая практика и здоровье. – 2017. – №4. – С. 114-122.
13. Китапова, Р.Р. Биологическая активность гуминовых веществ, получаемых из торфа и сапропеля / Р.Р. Китапова, А.У. Зиганшин // Казанский медицинский журнал. – 2015. – №1. – С. 84-89.
14. Глебова, Г.И. Гиматомелановые кислоты почв и их место в системе гумусовых кислот: автореф. дис… канд. биол. наук: 06.01.03 / Галина Ивановна Глебова; МГУ. – М.: МГУ, 1980. – 21 с.
15. Скут, Д. Основы аналитической химии / Д. Скут, Д. Уэст. – Т.1. – М.: Мир, 1979. – 453 с.
16. Molyneux, P. The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity / Songklanakarin J. Sci. Technol. – 2004. – Vol.26(2). – P. 211-219.
17. Орлов, Д.С. Гумусовые кислоты почв. – М.: МГУ, 1974. – 177 с.
18. Кухаренко, Т.А. Окисленные в пластах бурые и каменные угли. – М.: Недра, 1972. – 215 с.

S.L. Khil'ko /Cand. Sci. (Chem.)/, M.I. Rogatko, R.A.Makarova /Cand. Sci. (Chem.)/, R.G. Semyonova /Cand. Sci. (Chem.)/
L.M. Litvinenko Institute of Physic and Organic Chemistry and Coal Chemistry (Donetsk)
O.I. Nevecherya
Donetsk National University (Donetsk)

ANTIRADICAL AND POTENTIOMETRIC CHARACTERISTICS OF HUMIC SUBSTANCES FROM DIFFERENT NATURAL SOURCES

Background. *Humic substances (HS) are the most chemically active parts of brown coal, peat, soil humus, shale, and bottom sediments (sapropels), which make them unique objects for solving various chemical problems. The presence of hydroxyl groups in the structure of macromolecules causes the biological activity of humic substances and suggests their ability to antioxidant and antiradical action. Preparations of humic substances, both native and modified, are promising for use in agriculture, veterinary medicine, and technical sphere. In this regard, obtaining the preparations with the desired properties on the basis of humic substances is an urgent task.*
Materials and/or methods*. Humic acids obtained from analytical samples of brown coal of the Alexandria deposit by extraction of 0.1 n alkali solutions at two temperatures: 100 °C and 20 °C. Hymatomelanic acid obtained from these two fractions of humic acids by extraction with ethanol also at two*

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

different temperatures: 20 °C and the boiling point of the alcohol (80 ºC). Antiradical activity determined spectroscopically (Specord UV VIS) by the reaction of a stable free radical DPPH (2.2'-diphenyl-1-picrylhydrazyl) dissolved in ethanol or dimethylsulfoxide with preparations of humic substances. The number of hydroxyl groups determined by potentiometric titration of solutions of salts of humic substances with 0.1 n hydrochloric acid solutions.

***Results**. By the method of potentiometric titration studied the acid-base properties of humic and hymatomelanic acids from soft, earthy brown coal of the Alexandria deposit and from peat of Cherkasy deposit. From the differential titration curves data calculated the number of hydroxyl groups in the macromolecules of humic and hymatomelanic acids. Determined the antiradical activity of the fractions of humic and hymatomelanic acids from different samples of brown coal of Alexandria deposit and peat of Cherkasy Deposit in dimethyl- sulfoxide, and ethanol spectrophotometrically by the reaction of HS preparations with a stable DPPH radical.*

***Conclusion.** Shown that the range of variations of the functional composition of humic and hymatomelanic acids from different sources is not widespread. For carboxyl groups, the range of variation is in the range of 2.4…3.6 mg-eq/g, for hydroxyl groups – 2.0…3.6 mg-eq/g. Shown that the antiradical activity of fractions of humic substances in different solvents correlates with the number of hydroxyl groups in the structure of their macromolecules. The maximum antiradical activity observed for fractions of humic and hymatomelanic acids of Morozov layer.*

***Keywords:** salts of humic acids, salts hymatomelanic acids, antiradical activity, acid-base medium reaction, 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, UV-spectroscopy, potentiometry.*

Сведения об авторах

С.Л. Хилько
SPIN-код: 2972-0960
Author ID: 1020818
Телефон: +380 (71) 331-38-03
Эл. адрес: sv-hilko@yandex.ru

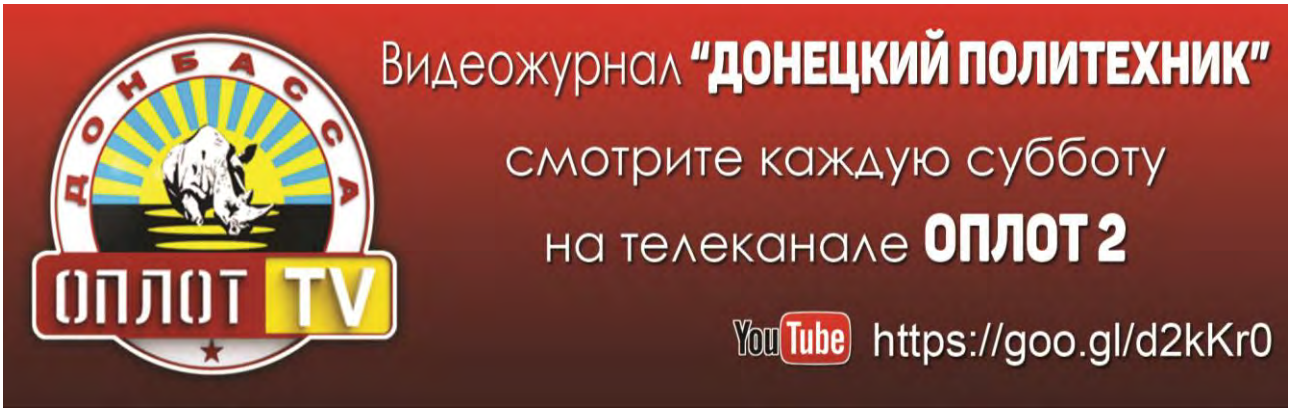
Р.А. Макарова
SPIN-код: 1486-6140
Author ID: 1020652
Телефон: +380 (71) 375-07-66
Эл. адрес: makarova.ra@yandex.ru

О.И. Невечеря
SPIN-код: 3247-4482
Author ID: 900791
Телефон: +380 (71) 397-22-08
Эл. адрес: nevecherya@bk.ru

М.И. Рогатко
SPIN-код: 7910-9203
Author ID: 1020592
Телефон: +380 (71) 428-85-12
Эл. адрес: marina.rogatko@gmail.com

Р.Г. Семенова
SPIN-код: 5696-3297
Author ID: 1020190
Телефон: +380 (95) 326-47-41
Эл. адрес: reemma2010@yandex.ua

Статья поступила 06.02.2019 г.
© С.Л. Хилько, М.И. Рогатко, Р.А. Макарова, Р.Г. Семенова, О.И. Невечеря, 2019
Рецензент д.х.н., проф. Ю.Б. Высоцкий



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

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.
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



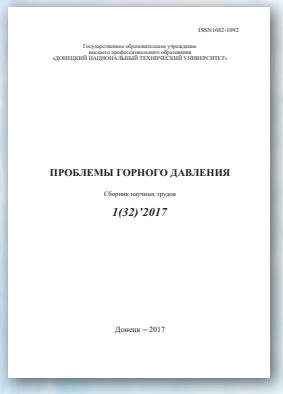
Научный журнал «Информатика и кибернетика»

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