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

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЕСТНИК

№4 (22) 2020 г.



АССОЦИАЦИЯ ВЫПУСКНИКОВ ДОННТУ

alumni.donntu.org

10 ЛЕТ ★ ★ ★ ИННОВАЦИЙ

НАУЧНЫЕ ИЗДАНИЯ Донецкого национального технического университета



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

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

Периодичность – 4 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



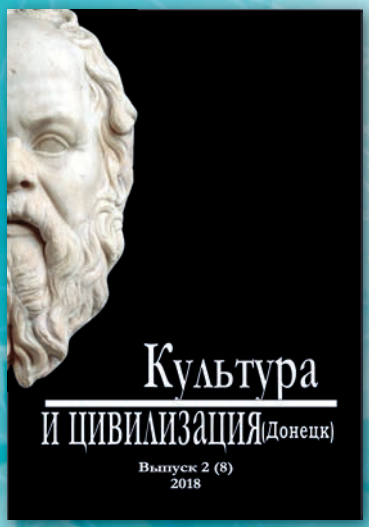
Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения»

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 №4(22)'2020

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.)*

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.)*
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.)*
Сотников А.Л. (д.т.н., доц.)*
Ченцов Н.А. (д.т.н., доц.)*
Шабаев О.Е. (д.т.н., проф.)*
Шаповалов В.В. (д.х.н., проф.)*
Яковченко А.В. (д.т.н., проф.)*
** - штатные сотрудники учредителя*

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

Вестник ДонНТУ
2020. №4(22)

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 №4 от 30.10.2020

Формат 60×84$^{1/8}$. Заказ 1220.
Изд-во «Донецкая политехника», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

В.Г. Гуляев, И.И. Бридун, Н.Н. Музолев, К.В. Гуляев
Динамические свойства приводов струговой установки с высокомоментным электродвигателем ЭКВС4-160У5 и пути их модернизации 3

И.В. Косарев, А.В. Мезников, А.Е. Волотов, В.П. Кондрахин
Повышение технического уровня и безопасности эксплуатации забойных скребковых конвейеров 11

И.В. Косарев, А.В. Мезников, А.В. Коваленко
Исследования технических параметров предохранительных клапанов шахтных механизированных крепей 22

В.А. Пенчук, Н.А. Юрченко, В.В. Пенчук
Повышение безопасности и ресурса грузоподъемных машин на базе цифровых технологий 30

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.Я. Бабанин, Б.Ф. Белов, А.Я. Минц, И.А. Абакумов
Технология выплавки полупродукта в дуговой сталеплавильной печи из металлошихты с повышенным содержанием окислов железа 38

С.А. Снитко, Н.П. Денищенко
Математическая модель поверхности круглого калибра 43

ИНФОРМАЦИЯ

Требования к статьям, направляемым в редакцию 49

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 №4(22)'2020

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.)*

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.)*
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.)*
Sotnikov A.L. (Dr. Sci. (Eng.), Assoc. 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
2020. No.4(22)

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.4 dated 30.10.2020

Format 60×84$^{1/8}$. Order 1220
Publishing house
"Donetsk Polytechnic", 2020

CONTENTS

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION ENGINEERING

V.G. Gulyaev, I.I. Bridun, N.N. Muzolev, K.V. Gulyaev
Dynamic properties of plough plant drives with EKVS4-160U5 high-torque electric motor and ways to modernize them 3

I.V. Kosarev, A.V. Meznikov, A.E. Volotov, V.P. Kondrakhin
Improving technical level and safety operation of face scraper conveyors 11

I.V. Kosarev, A.V. Meznikov, A.V. Kovalenko
Research of technical parameters of safety valves of mine mechanized supports 22

V.A. Penchuk, N.A. Yurchenko, V.V. Penchuk
Improving the safety and resource of lifting machines based on digital technologies 30

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

A.Ya. Babanin, B.F. Belov, A.Ya. Mints, I.A. Abakumov
The technology of smelting semi-product of metal charge with high content of iron oxides in an arc steel-melting furnace 38

S.A. Snitko, N.P. Denishchenko
A mathematical model of the round gauge surface 43

INFORMATION

Requirements for the papers submitted to the Editorial office 49

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 622.23.054.2.004.15:681.127.2.004.15

В.Г. Гуляев /д.т.н./, И.И. Бридун /к.т.н./, Н.Н. Музолев
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
К.В. Гуляев /к.т.н./
ПК «УНИПАК» (Донецк)

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИВОДОВ СТРУГОВОЙ УСТАНОВКИ С ВЫСОКОМОМЕНТНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ЭКВС4-160У5 И ПУТИ ИХ МОДЕРНИЗАЦИИ

Выполнены исследования сложных электромеханических систем приводов струговой установки с использованием динамической характеристики асинхронного двигателя с учетом особенностей его демпфирующих свойств и режимов работы. Предложены пути модернизации для повышения технического уровня струговой установки с электродвигателем ЭКВС4-160У5.

Ключевые слова: *струговая установка, электромеханический привод, тяговая цепь, динамика, переходные режимы работы, динамические нагрузки, демпфирование.*

Постановка проблемы

Тенденции и проблемы создания современных механизированных струговых комплексов (МСК) для безлюдной технологии выемки тонких угольных пластов рассмотрены в работах [1…3]. В составе МСК предусматривается использование высокотехнологичного силового оборудования, частотно-регулируемых электроприводов и интеллектуальных компонент в системах управления, позволяющих автоматически адаптировать режим работы приводов струга к оперативным условиям функционирования МСК.

Однако при частых реверсах струговых приводов и широком диапазоне регулирования скорости асинхронного двигателя (АД) возможны резонансные явления и высокие уровни вибрации и шума. Так, для приводов струговых установок (СУ) СО-75 и СН-75, с АД мощностью 160 кВт, установлен корректированный уровень звуковой мощности соответственно 129 и 118 дБА. Превышение предельно допустимых норм вибрации (ПДВХ) и шума (ПДШХ) в приводах с высоким уровнем энерговооруженности недопустимо, так как снижаются надежность привода струга, эффективность и безопасность его применения [3…5].

В сложных эксплуатационных условиях отработки угольных пластов крепкого угля длинными лавами обязательным условием достижения высокой надежности приводов и эффективности применения струговых комплексов является применение электроприводов с оптимальными динамическими свойствами и высокопрочных тяговых цепей, соответствующих требованиям межгосударственного стандарта ИСО 610.90 и ГОСТ 13561-89 [3,6,7] на параметры и профиль зубьев приводных звезд.

Анализ последних исследований и публикаций

В работах [8,9] рассмотрены возможные случаи прохождения через резонанс линейной динамической системы с одной степенью свободы, отмечены особенности их протекания с учетом демпфирования. Однако установленные закономерности и определение скорости прохождения через резонанс крутильной системы с электродвигателем выполнены без учета его динамической характеристики.

Для предупреждения развития больших амплитуд прохождение через резонанс рекомендуется производить с большим ускорением. Поэтому для стругового высокоэффективного АД ЭКВС4-160У5, созданного институтом «УкрНИИВЭ», установлено время разгона ротора при реверсах не более 2 с [10].

В работах В.Л. Вейца [11] установлено, что при высоких отношениях электромагнитной постоянной двигателя к механической постоянной T_M ($\upsilon_T=T_э/T_M>1$), что может иметь место в рассматриваемых электромеханических системах приводов СУ, переходные процессы в двигателе оказывают весьма существенное влияние на значения коэффициента динамичности и амплитуды крутильных колебаний в приводе.

Актуальность исследования взаимозависимости характеристик электродвигателя и механической части привода машин, в том числе с программным управлением, отмечена также в работах проф. И.И. Вульфсона [12,13].

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

Таким образом, необходимы исследования динамических свойств струговых электроприводов с учетом влияния переходных электромагнитных процессов в АД на динамические свойства и динамику нагрузок привода струга в установившихся и переходных режимах.

Цель (задачи) исследования

Задачей исследования является разработка выводов и рекомендаций по повышению технического уровня струговых установок на основе совершенствования динамических свойств их приводов с учетом взаимодействия электродвигателя с механической частью привода.

Основной материал исследования

Объектом исследования принят механизированный струговый комплекс (МСК) ОАО «ШахтНИУИ», характеристики которого приведены в табл. 1.

Формирование эксплуатационного спектра нагрузок струговых приводов обусловлено взаимодействием полезных технологических нагрузок на резцах и автоколебательных процессов в тяговой цепи, обусловленных нелинейным законом трения в опорах корпуса струга на конвейер при «установившихся» режимах работы, а также и динамикой переходных электромагнитных процессов в двигателях при частых пусках и реверсах с учетом демпфирующих свойств АД и коэффициента связанности его с механической частью динамической системы.

Такие исследования выполнены применительно к электромеханическим системам приводов очистных комбайнов [14] и высоконапорных насосных агрегатов насосных станций [15]. Опыт выполненных работ свидетельствует о необходимости исследования сложных электромеханических систем приводов СУ с использованием динамической характеристики АД с учетом особенностей его демпфирующих свойств и режимов работы.

Характеристика АД ЭКВС4-160У5 для режима работы *S*4 при коэффициенте инерции *FI*=1,6, ПВ 90 %, 120 вкл./ч приведена в табл. 2.

Редуктор в приводе струга оснащается упругой муфтой и устройством для безопасного натяжения тяговой цепи [4]. Таким образом частично устраняются причины формирования внутренней динамики привода струга: из-за непостоянства натяжения цепи и передаточного отношения зубчатых передач, обусловленных эксцентричностью начальных окружностей и кинематической неточностью зубчатых колес. Принципы определения и устранения динамических нагрузок в приводе от «внутренней» динамики работы зубчатых передач рассмотрены в работах [16,17].

Применение для очистных комбайнов К103М, КА80, КА200 и УКД 200…250 вынесенных систем перемещения (ВСП) с тягово-цепными движителями рассмотрено в работе [18]. Построение профиля зубьев ведущей звездочки выполнено по ГОСТ 13561-82, а схема зацепления цепи – через одно звено: при контактировании со звездой только горизонтальных звеньев. Такая схема зацепления является «слабым звеном» т.к. в зонах рабочего контакта формируются высокие давления, процесс зацепления протекает с проскальзыванием и сопровождается интенсивным износом. Поэтому тягово-скоростные характеристики рассматриваемых ВСП с цепями калибра 26×92с и 30×108с обеспечивают при мощности привода 2×55 и 2×75 кВт, скорости подачи 5 м/мин при максимальном тяговом усилии 200…250 кН (или 6 м/мин при максимальном усилии 300 кН).

Для сравнения рассмотрим тягово-скоростную характеристику привода СУ мощностью

Табл. 1. Характеристики механизированного стругового комплекса для выемки угольных пластов 0,85…1,4 м

Возможный прототип струговой установки – 2СН341З	
Сопротивляемость пласта, кН/м	250/150
Длина очистного забоя, м	200…250
Производительность очистной выемки, $м^2$/мин	5,2
Мощность привода струга, кВт	2×160; или 2×85/250
Мощность привода конвейера, кВт	2×160
Тяговый орган струга, калибр цепи, класс прочности	30×108с; или 34×126с
Тяговый орган конвейера, калибр цепи	26×92-с
Высота ИО, мм: минимальная…максимальная Регулировка по высоте	850…1350 ступенчатая
Электрооборудование, аппаратура автоматики	АРУ С1.М
Работа СУ в МСК с крепью типа	ЩМК 2КС21-6

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

Табл. 2. Характеристики электродвигателя АД ЭКВС4-160У5

Параметр и его единица измерения	Номинальное значение
Номинальная мощность, кВт	160
Сила пускового тока статора, А	1745
Номинальная сила тока статора, А	206
Номинальный пусковой момент, Н.м	3400
Минимальный момент, Н.м	2750
Максимальный момент, Н.м	4600
Момент инерции, кг.м^2	1,35
Коэффициент полезного действия, %	93
Коэффициент мощности, о.е.	0,73
Синхронная частота вращения, об/мин	1500
Номинальное скольжение, %	2,3
Кратность силы начального пускового тока к силе номинального	8,5
Кратность начального пускового момента к номинальному	3,26
Кратность максимального момента к номинальному	4,41
Время разгона, с, не более	2
Расход воды, м^3/час, не менее	1,6
Давление воды на входе, МПа	2,0

2×160 кВт, скорость струга 2 м/с, тяговые усилия в цепи на уровне пробной нагрузки 900 кН (для цепи 30×108с ГОСТ 25996-97 (ИСО 610-90). Условием длительной и надежной работы зацепления тяговой цепи с ведущей звездочкой является передача усилий зубьями ведущей звезды всем звеньям цепи в пределах угла охвата ею ведущей звезды.

В соответствии с ГОСТ Р 53650-2009 и ГОСТ ИСО 610.90 в приводах струговых установок должны применяться только специальные калиброванные электросварные высокопрочные круглозвенные тяговые цепи калибра от 14 до 30 мм трех классов прочности: *B, C* и *D*. Цепи классов прочности *C* и *D* изготавливаются из сталей, легированных никелем, хромом и молибденом. Их высокие характеристики прочности на растяжение, усталостную выносливость и ударную вязкость обеспечиваются соответствующей термообработкой в процессе высокотехнологичного изготовления и стандартными испытаниями на статическое растяжение и на усталость [6].

Качество зацепления тяговых круглозвенных высокопрочных цепей с ведущими звездочками обеспечивается при выполнении требований ГОСТ 13561 «Звездочки для грузовых и тяговых круглозвенных цепей. Методы расчета и построения профиля зубьев» [7].

В структуре анализируемой динамической системы можно выделить две парциальные системы (с одной степенью свободы):

– электромеханическую систему привода СУ, динамические свойства которой определяются в основном параметрами электродвигателя, редуктора, приводной звезды и тяговой цепи со струг (в состав первой парциальной системы могут входить двухскоростные АД с синхронной частотой 1500 и 500 об/мин и редуктор с системой защиты от перегрузки *UEL*);

– парциальную механическую систему «струг – тяговая цепь», длина рабочей ветви которой меняется от l_{min}–l_{max} в каждом цикле, что можно учесть при определении ее собственных частот колебаний.

Непосредственными задачами исследования являются: определение собственных частот колебаний АД и привода струга в целом; исследование крутильных колебаний в приводе с учетом динамической характеристики АД; установление неравномерности угловой скорости двигателя в установившемся режиме работы; оценка возможности резонансных режимов колебаний; пути снижения вероятности резонансных явлений.

В состав привода струга входят: АД типа ЭКВС4-160У5, редуктор с упругой соединительной муфтой, на выходном валу редуктора (u=11,84) закреплена ведущая звездочка с $R_{зв}$=0,15 м, цепь калибра 30×108 с длиной 400 м. Рабочая ветвь цепи перемещает струг, отделяющий от пласта уголь и грузящий его на конвейер. Выемка угля ведется по челноковой схеме в лаве длиной 200 м.

Приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции подвижных частей привода струга и тяговой цепи определяется по формуле:

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

$$J_{\Sigma пр} = J_р + J_{ред} + \frac{J_{зв}}{u_{ред}^2} + \frac{(m_с + m_ц)\omega_д^2}{V_с^2}, \text{ кг·м}^2,$$

где $J_р$ – массовый момент инерции ротора двигателя; $J_{ред}$ – момент инерции зубчатых передач редуктора; $J_{зв}/u_{ред}^2$ – приведенный момент инерции ведущей звезды; $(m_с+m_ц)(V_с/\omega_д)^2$ – приведенные к валу двигателя моменты инерции поступательно перемещающихся масс струга и рабочей ветви тяговой цепи.

Далее рассматривается методика исследования крутильных колебаний в приводе струга без учета продольных колебаний корпуса струга и тяговой цепи. При определении собственных частот АД и привода в целом учитывались структура привода и правила расчета приведенных масс частей привода.

Пренебрегая упругими и диссипативными свойствами зубчатых передач редуктора, соединительной упругой муфты и других звеньев механической части привода, уравнение динамики его движения как парциальной системы записываем в виде уравнения Лагранжа:

$$\left[J_р + J_н(\varphi)\right]\frac{d\,\omega_д}{dt} + 0{,}5\omega_д^2\frac{dJ(\varphi)}{d\varphi} = M_д - M_с. \quad (1)$$

Уравнение (1) нелинейное с переменными коэффициентами в левой части. В правой части (1) $M_д$ соответствует динамической характеристике АД:

$$\omega_д = \omega_0\left[1 - v\left(M_д + T_э\frac{dM_д}{dt}\right)\right], \quad (2)$$

где $\omega_д$, ω_0 – угловые скорости ротора двигателя и скорость его идеального холостого хода ($\omega_0=\omega_с/p$, $с^{-1}$; $\omega_с$ – круговая частота питающей сети, p – число пар полюсов); $T_э$ – электромагнитная постоянная времени АД ($T_э=1/\omega_с S_k$, с, где $\omega_с=2\pi f_с=314$ $с^{-1}$ при $f_с=50$ Гц; S_k – критическое скольжение АД);

$$S_k = \left(1 - \frac{\omega_д}{\omega_0}\right)\left(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}\right),$$

где $\zeta=M_k/M_н$ – перегрузочная способность АД; M_k, $M_н$ – критический и номинальный момент АД; $v=S_k/2M_k$ – крутизна статической характеристики АД.

Переменный момент инерции отдельных звеньев $j_н(\varphi)$ рабочей ветви тяговой цепи можно представить в виде:

$$J_н(\varphi) = \bar{J}_н + \tilde{J}_н(\varphi) \approx \bar{J}_н = \text{const}, \quad (3)$$

где $\bar{J}_н$ – постоянная составляющая суммы приведенных моментов инерции струга и рабочей ветви цепи; $\tilde{J}_н(\varphi)$ – переменная часть момента инерции тяговой цепи струга, которой в первом приближении можно пренебречь.

С учетом допущения, что $\tilde{J}_н(\varphi) = 0$, уравнение (1) примет вид:

$$\left(J_р + \bar{J}_н\right)\frac{d\omega_д}{dt} = M_д - M_с. \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (2) и (4), получим

$$vT_э J_{ПА}\frac{d^2\omega_д}{dt^2} + vJ_{ПА}\frac{d\,\omega_д}{dt} + \frac{\omega_д}{\omega_0} = 1 - v\left(M_с + T_э\frac{dM_с}{dt}\right), \quad (5)$$

где $J_{ПА} = J_р + \bar{J}_н = \text{const}$ – приведенный к валу АД момент инерции привода струга.

С целью линеаризации уравнения (5) представим момент сопротивления $M_с(t) = \bar{M}_с + \tilde{M}_с(t)$, а угловую скорость двигателя $\omega_д(t) = \bar{\omega}_д + \tilde{\omega}_д(t)$.

Постоянную составляющую $\bar{\omega}_д$ определим, пользуясь статической характеристикой АД при $\bar{M}_д = \bar{M}_с$:

$$\bar{\omega}_д = \omega_0\left(1 - v\bar{M}_с\right). \quad (6)$$

Подставив (6) в (5), после ряда преобразований получим линеаризованное дифференциальное уравнение динамики привода 2СН3413 в виде неоднородного уравнения второго порядка относительно переменной составляющей скорости АД $\tilde{\omega}_д$:

$$\frac{d^2\tilde{\omega}_д}{dt^2} + 2n\frac{d\tilde{\omega}_д}{dt} + k^2\tilde{\omega}_д = W(t), \quad (7)$$

где $n = 0{,}5T_э^{-1}$ – характеристика диссипативных свойств АД, $с^{-1}$; $k^2 = \left(vT_э J_{ПА}\omega_0\right)^{-1}$ – квадрат собственной круговой частоты колебаний привода; $W(t)$ – функция возмущения, характеризующая воздействия на привод технологических сил сопротивления $M_{сси}(t)$ и сил инерции $M_{си}(t)$.

$$W(t) = -\frac{1}{J_{ПА}}\left(\frac{\tilde{M}_с(t)}{T_э} + \frac{d\tilde{M}_с(t)}{dt}\right). \quad (8)$$

Суммарный момент сопротивления $M_с(t)$, приведенный к валу АД, можно представить в виде:

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

$$M_c(t) = M_{ссн}(t) + M_{сПн}(t) = \\ = \overline{M}_c + \tilde{M}_{ссн}(t) + \tilde{M}_{си}(t) \quad , \qquad (9)$$

где $\overline{M}_c$ – средняя составляющая полезной технологической нагрузки в приводе струга; $\tilde{M}_{ссн}(t)$ – переменная составляющая технологической нагрузки (силовое возбуждение, обусловленное характером разрушения угля и автоколебаниями в системе перемещения струга (СПС); $\tilde{M}_{си}(t)$ – переменная составляющая момента сопротивления, обусловленная действием инерционных сил в цепном приводе (кинематическое возбуждение в зацеплении зуба звезды – круглозвенная цепь) [2].

Определив $\tilde{M}_{ссн}(t)$, $\tilde{M}_{си}(t)$ и $W(t)$, можно решить уравнение (7) и установить амплитуды и частоту крутильных колебаний ротора АД, оценить неравномерность его угловой скорости $\omega_д$ и возможность резонансных режимов.

Необходимые для решения уравнения (7) параметры привода СУ 2СН3413 с электродвигателем приведены в табл. 3.

Табл. 3. Параметры системы привода СУ 2СН3413 с АД ЭКВС4-160

№ п/п	Наименование параметра	Формула для расчета	Значение параметра при $U_ф = U_{ном}$
1	Номинальный момент АД, Н·м	$M_н = \frac{9550P_{2н}}{n_c(1-S_н)}$	1042
2	Критическое скольжение АД, %	$S_k = S_н\left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}\right)$	20
3	Крутизна статической характеристики АД, Н·м$^{-1}$	$v = \frac{S_k}{2M_k}$	21,77·10^{-6}
4	Электромагнитная постоянная времени АД, с	$T_э = (\omega_c S_k)^{-1}$	0,0164
5	Механическая постоянная времени АД, с	$T_M = v\omega_0 J_p$	0,0046
6	Отношение постоянных времени АД	$\upsilon_{T_{АД}} = \frac{T_э}{T_M}$	3,56
7	Приведенный к валу АД момент инерции привода струга, кг·м^2	$J_{ПА} = J_p + J_{ред} + J_{зв}/U_p^2 + \\ + (m_c + m_{pb})/\left(\frac{V_c}{\omega_д}\right)^2$	3,44
8	Механическая постоянная привода струга, с	$T_{Мпр} = v\omega_0 J_{ПА}$	0,012
9	Отношение постоянных времени привода струга	$\upsilon_{T_П} = \frac{T_э}{T_{Мпр}}$	1,37
10	Коэффициент крутильной жесткости АД, Нм/рад	$C_д = 2pM_K$	18400
11	Собственная частота привода без учета демпфирования, с$^{-1}$	$K'_n = \sqrt{\frac{C_д}{J_{ПА}}}$	72,5 (11,5 Гц)
12	Коэффициент вязкости демпфирующих сил, с$^{-1}$	$n = 0{,}5T_Э^{-1}$	30,48
13	Относительный коэффициент демпфирования	$\delta = \frac{n}{K_{пр}}$	0,42
14	Собственная частота колебаний привода с учетом демпфирования, с$^{-1}$	$K_П = K'_П\sqrt{1-\delta^2}$	65,8 (10,5 Гц)
15	Частота возмущений от вала АД, с$^{-1}$	$\omega_д = (1-S_н)\omega_0$	153,4 (24,4 Гц)
16	Частота возмущений от ведущей звезды, с$^{-1}$	$\omega_{зв} = \frac{\omega_д}{U_{ред}}$	12,8 (1,32 Гц)
17	Отношение основной частоты возмущений к собственной	$z = \frac{\omega_{зв}}{K_{пр}}$	1,11

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

Как следует из табл. 3, электропривод струга работает в режиме близком к резонансу: z = 1,11 при значениях $\upsilon_{T_{АД}}$ =3,56 и $\upsilon_{T_{П}}$ =1,37. Полученные значения отношений постоянных времени двигателя $\upsilon_{T_{АД}}$ =3,56 и привода $\upsilon_{T_{П}}$ =1,37 свидетельствуют о существенном влиянии демпфирующих свойств двигателя (n=30,48 с$^{-1}$) на динамические процессы крутильных колебаний в приводе при переходных процессах.

Как известно [11,12], чем выше их значения, тем сильнее переходные процессы в приводном двигателе влияют на динамические процессы в электромеханической системе привода струга.

Для получения сопоставимых данных о крутильных колебаниях в приводе струга решим уравнение (7) также применительно к работе привода в режиме: $M_{сст}(t) \approx 0$; при действии только кинематических и инерционных составляющих

$$M_c(t) = \tilde{M}_{cu}(t) = 114{,}3\sin\left(\omega_э t + 54^o 14'\right).$$

Для этого режима определим согласно (8) функцию возмущения $W(t)$:

$$\begin{aligned} W(t) &= -J_{ПА}^{-1}\left(T_э^{-1}114{,}3\sin\left(\omega_э t + 54^o 14'\right) + \right. \\ &\left. + 114{,}3\omega_э \cos\left(\omega_э t + 54^o 14'\right)\right) = \\ &= -Q_1 \sin\left(\omega_э t + 54^o 14'\right) = \\ &= -6626\sin\left(\omega_э t + 54^o 14'\right), \text{ рад/с}^3, \end{aligned} \qquad (10)$$

где $Q_1 = |6626|$ рад/с^3 – амплитуда первой гармоники $W(t)$, характеризующая скорость изменения ускорения.

Решением уравнения (7) при учете возмущения только от первой гармоники будет

$$\tilde{\omega}_д = \tilde{\omega}_д^{(1)} \sin\left(\omega_э t + \psi_1 - \Delta_1\right), \qquad (11)$$

где $\Delta_1 = \text{arctg}\dfrac{2n\omega_э}{K_{пр}^2 - \omega_э^2} = 79^o 11'$.

Амплитуда первой гармоники угловой скорости АД с учетом коэффициента динамичности $K_д$=1,88 будет

$$\tilde{\omega}_д^{(1)} = \frac{Q_1}{\sqrt{\left(K_{пр}^2 - \omega_э^2\right) + 4n^2\omega_э^2}} = 3{,}73 \text{ рад/с}.$$

Размахи $\tilde{\omega}_д$ при крутильных колебаниях ротора на частоте 12,8 с$^{-1}$ составляют $2\tilde{\omega}^{(1)}$=7,46 рад/с, а неравномерность скорости АД – 4,8 %.

При принятых допущениях такими же будут крутильные колебания приводного вала и ведущей звезды. Фактически частотный спектр крутильных колебаний шире, так как функция автоколебаний в общем случае обуславливает поли гармонические колебания $\tilde{M}_{cu}(t)$ [2]. В дальнейших исследованиях необходимо более детально изучить влияние продольных колебаний корпуса струга при переменной длине и жесткости рабочего участка тяговой цепи на крутильные колебания в приводе.

Выводы

В эксплуатационном спектре нагрузок привода анализируемой СУ формируются возмущения в зацеплении тяговой цепи с ведущей звездой (12,8 с$^{-1}$) при собственной частоте электропривода 11,5 с$^{-1}$. При этом на вращение ротора с частотой 153,8 с$^{-1}$ накладываются крутильные колебания с частотой 11,5 с$^{-1}$ амплитудой 3,73 рад/с. Неравномерность угловой скорости двигателя составляет 4,8 %.

Высокое отношение электромагнитной постоянной времени двигателя к механической постоянной (V_T=$T_э$/T_M=3,56≥1) подтверждает значительные изменения вращающего момента и скорости АД и существенное влияние его демпфирующих свойств (n=30,48 с$^{-1}$) на динамику электромеханических процессов в приводе при переходных и установившихся режимах работы.

Результаты теоретических исследований динамических свойств электромеханической системы привода СУ с АД ЭКВС4-160 согласуются с оценкой его эксплуатационных показателей. Высокие моментные характеристики двигателя и повышенное скольжение (S_k=20 %) обеспечивают устойчивую работу привода СУ в режиме $S4$ (90;120;1,6) и при формировании пиковых нагрузок на резцах и в тяговой цепи струга.

С целью дальнейшего повышения технического уровня исследуемого объекта можно рекомендовать:

– модернизировать привод СУ 2СН3413 путем оснащения редуктора системой виброзащиты с муфтой типа *UEL* и применения демпфера-амортизатора в соединении тяговой цепи класса прочности *D* с корпусом струга, с целью защиты привода и тяговой цепи от высоких пиковых нагрузок;

– для применения в СУ типа 2СН3413 двухскоростных частотно-регулируемых двигателей необходимо выполнить дополнительные исследования с использованием математической модели системы перемещения струга с частотно-регулируемыми электроприводами с учетом интеллектуальных компонент в системе автоматического управления и защиты.

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

Список литературы

1. Гуляев, В.Г. Состояние и проблемы комплексной механизации при разработке полого-наклонных угольных пластов Донецкого бассейна / В.Г. Гуляев, В.В. Косарев // FORUM Polsko-Ukrainskie, Szcyrk, 18-22 Lutego 2002. Seria Wyklady, nr.21. – Krakow, 2002. – P. 19-25.
2. Гуляев, В.Г. Актуальность и проблемы создания автоматизированных струговых комплексов для безлюдной выемки пологих тонких угольных пластов Донецкого бассейна. // Новые технологии. Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – №5. – С. 14-23.
3. Гуляев, В.Г. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. Ч.3. Струговые установки и автоматизированные струговые комплексы (теория рабочих процессов и методы повышения надежности) / В.Г. Гуляев, И.В. Косарев; под общ. ред. В.Г. Гуляева. – Донецк: Технопарк «УНИТЕХ», 2018. – 248 с.
4. Расчет и конструирование струговых установок / Б.Б. Луганцев [и др.]. – М.: Горная книга, 2011. – 291 с.
5. РД 12.23.102-85. Машины горные. Методика установления значений шумовых и вибрационных характеристик. Срок введения с 01.07.86 г. Издание официальное.
6. Межгосударственный стандарт ГОСТ25996-83 (ИСО 610-90). Цепи круглозвенные высокопрочные для горного оборудования. Технические условия. Дата введения 2000-07-01. – М.ИПК: Издательство стандартов, 2000.
7. ГОСТ 1356-61-89 (СТ СЭВ 1593-88). Звездочки для грузовых и тяговых круглозвенных цепей. Методы расчета и построения профиля зубьев. Дата введения 1990-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1989.
8. Голоскоков, Е.Г. Нестационарные колебания механических систем / Е.Г. Гороскоков, А.П. Филиппов. – Киев: Наук. думка, 1966. – 336 с.
9. Филиппов, А.П. Колебания деформируемых систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 736 с.
10. Кирилюк, В.И. Опыт создания высокоэффективного электродвигателя для струговых установок / В.И. Кирилюк, О.Л. Абара // Взрывозащищенное электрооборудование. – 2010. – №1. – С. 194-198.
11. Вейц, В.Л. Динамика машинных агрегатов. – Л.: Машиностроение, 1969. – 370 с.
12. Вульфсон, И.И. К проблеме динамической взаимозависимости электродвигателя и механического привода цикловых машин // Теория механизмов и машин. – 2016. – №14(22). Т.14. – С. 173-181.
13. Вульфсон, И.И. Анализ чувствительности динамики цикловых механизмов к характеристикам электродвигателя // Вестник научно-технического развития. – 2019. – №1(137). – С. 3-13.
14. Стариков, Б.Я. Асинхронный привод очистных комбайнов / Б.Я. Стариков, В.Л. Азарх, З.М. Рабинович. – М.: Недра, 1981. – 288 с.
15. Гуляев, В.Г. Виброакустические процессы и надежность гидроэнергетических установок очистных комплексов: монография / В.Г. Гуляев, К.В. Гуляев, С.А. Китаева: под общ. ред. В.Г. Гуляева. – Донецк: Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2012. – 224 с.
16. Гуляев, В.Г. Динамические модели для исследования виброактивности насосных агрегатов в системах гидропривода механизированных крепей / В.Г. Гуляев, К.В. Гуляев, С.А. Анохина // Наукові праці ДонНТУ. – 2007. – Вип.14(127). – С. 81-92 (серія: гірничо-електромеханічна).
17. Ключев, В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. – М.: Энергия, 1971. – 320 с.
18. Кондрахин, В.П. Электрические механизмы перемещения очистных комбайнов / В.П. Кондрахин, В.В. Косарев, Н.И. Стадник / под общ. ред. д.т.н. В.П. Кондрахина. – Донецк: ООО «Технопарк ДонНТУ «УНИТЕХ», 2010. – 257 с.

V.G. Gulyaev /Dr. Sci. (Eng.)/, I.I. Bridun /Cand. Sci. (Eng.)/, N.N. Muzolev
Donetsk National Technical University (Donetsk)
K.V. Gulyaev /Cand.Sci. (Eng.)/
PC «UNIPAK» (Donetsk)

DYNAMIC PROPERTIES OF PLOUGH PLANT DRIVES WITH EKVS4-160U5 HIGH-TORQUE ELECTRIC MOTOR AND WAYS TO MODERNIZE THEM

Background. *As part of the mechanized plough plants, it is planned to use high-tech power equipment, frequency-controlled electric drives, and intelligent components in control systems that automatically adapt the operating mode of the plough drives to the operational conditions of the operation of the treatment plant equipment.*

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

Materials and/or methods. *The formation of the operational spectrum of loads of plough drives is due to the interaction of useful technological loads on the cutters, and self-oscillating processes in the chain from the nonlinear law of friction in the plough supports on the conveyor under «steady» operating modes, as well as the dynamics of transient electromagnetic processes in engines with frequent starts and reversals, taking into account the damping properties of the asynchronous motor (AM) and its connection with the mechanical part of the dynamic system.*

Such studies were carried out concerning the electromechanical drive systems of cleaning combines and high-pressure pumping units of pumping stations. The work experience indicates the need to study complex electromechanical systems of plough plant (PP) drives using the dynamic characteristics of the AM, taking into account the features of its damping properties and operating modes.

The plough drive structure includes: AM type EKVS4-160U5, a gearbox with an elastic coupling, a drive sprocket is fixed on the output shaft of the gearbox, a chain of calibre 30x108c with a length of 400 m. The chain's working branch moves the plough, which separates the coal from the formation and loads it on the conveyor. Coal mining is carried out according to the shuttle scheme in the lava with a length of 200 m.

Next, the method of studying torsional vibrations in the plough drive without considering the longitudinal vibrations of the plough body and the traction chain is considered. When determining the natural frequencies of the AM and the drive as a whole, the structure of the drive and the rules for calculating the reduced masses of the drive parts were taken into account.

Results. *In the drive of the analyzed PP disturbances are formed in the traction chain's engagement with the drive sprocket (12.8 s^{-1}) at the natural frequency of the electric drive of 11.5 s^{-1}. At the same time, torsional resonant oscillations with a frequency of 11.5 s^{-1} and amplitude of 3.73 rad/s are superimposed on the rotor's rotation with 153.8 s^{-1} frequency. The unevenness of the angular velocity of the engine is 4.8 %.*

Conclusion. *In further studies, it is necessary to study in more detail the effect of longitudinal vibrations of the plough body with variable length and stiffness of the working section of the traction chain on torsional vibrations in the drive.*

Keywords: *plough plant, electromechanical drive, traction chain, dynamics, transient operating modes, dynamic loads, damping.*

Сведения об авторах

В.Г. Гуляев
SPIN-код: 8179-6566
Телефон: +380 (95) 748-72-32
Эл. почта: vggulyaev@gmail.com

И.И. Бридун
SPIN-код: 4856-8561
Author ID: 851115
ORCID iD: 0000-0002-3199-8518
Телефон: +380 (71) 332-80-60
Эл. почта: ss13835@yandex.ru

Н.Н. Музолев
Телефон: +380 (71) 304-59-50
Эл. почта: nikola_1958@mail.ru

К.В. Гуляев
Телефон: +380 (71) 348-30-41
Эл. почта: kvgulayev@gmail.com

Статья поступила 10.12.2020 г.
© В.Г. Гуляев, И.И. Бридун, Н.Н. Музолев, К.В. Гуляев, 2020
Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев

УДК 622.647

И.В. Косарев, А.В. Мезников, А.Е. Волотов
ГУ «Донецкий научно-исследовательский проектно-конструкторский и экспериментальный институт комплексной механизации шахт» (ДОНУГЛЕМАШ) (Донецк)
В.П. Кондрахин /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАБОЙНЫХ СКРЕБКОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Выполнен анализ парка забойных скребковых конвейеров на шахтах Донецкой Народной Республики и рассмотрены результаты их использования, определены направления повышения технического уровня, эффективности и безопасности эксплуатации, сформулированы основные технические требования для создания типоразмерного ряда конвейеров нового технического уровня.

***Ключевые слова**: скребковый конвейер, приводной блок, рештачный став, безопасность, станция управления, пусковые режимы.*

Постановка проблемы

Угольная промышленность Донецкой Народной Республики (ДНР) является основой ее энергетической безопасности. Практически весь объем добычи (свыше 97 % в 2019 г.) осуществляется комплексно-механизированными забоями (КМЗ), в которых скребковый конвейер обеспечивает взаимную увязку машин в комплексе. Кроме выполнения транспортной функции он является погрузочным устройством, опорой для очистного комбайна или струга, основой тягового органа механизма подачи комбайна, средством для расположения кабелей и шлангов на ставе конвейера и в траковой цепи кабелеукладчика, а также является базой для перемещения секций механизированной крепи.

Поставка новых скребковых конвейеров на шахты ДНР за последние 5 лет практически не производилась, только один конвейер СП26У, изготовленный ГП «Донецкгормаш», был поставлен ОП «Шахта им. А.А. Скочинского» ГП «ДУЭК» в 2019 г. Поддержание конвейеров в работоспособном состоянии осуществлялось за счет проведения на ремонтных и машиностроительных предприятиях капитальных ремонтов приводных блоков с изготовлением узлов рештачных ставов и навесного оборудования. При эксплуатации очистных механизированных комплексов возникает много вопросов по безопасности работ, связанных с нерегламентированной транспортировкой конвейером материалов и узлов горно-шахтного оборудования (ГШО).

Для обеспечения эффективной работы забойных скребковых конвейеров необходимо, кроме обеспечения качественного капитального ремонта на специализированных предприятиях, выполнение работ по разработке и освоению в производстве скребковых конвейеров высокого технического уровня с решением вопросов повышения безопасности их эксплуатации. Как показывает опыт передовых угледобывающих стран, требуемый технический уровень может быть достигнут за счет применения многоприводных двухскоростных скребковых конвейеров.

Анализ последних исследований и публикаций

Основные промышленные запасы угля ДНР сосредоточены в пластах мощностью от 0,7 до 2,0 м [1]. Среднединамическая мощность пластов составляет 1,15 м. Диапазон отрабатываемых пластов, как правило, определяет номенклатуру забойных скребковых конвейеров.

По результатам работы угледобывающих предприятий в работах [1…3] определена структура парка конвейеров, находящихся на шахтах ДНР в эксплуатации в 2019 г., при отработке пластов мощностью 0,85…1,62 м, и произведен анализ их конструктивных особенностей:

– тип конвейера по расположению тяговых цепей;

– калибр цепи тягового органа;

– мощность приводных блоков;

– привод конвейера, конструкция приводных блоков;

– конструкция редукторов;

– конструкция рештачных ставов, в т.ч. тип боковины рештачного става;

– конструкция станций управления.

Проанализированы требования нормативных документов по безопасности труда при эксплуатации конвейеров, включая требования по

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

транспортировке ими материалов и других грузов.

Выполненные исследования перспективных многоприводных двухскоростных скребковых конвейеров [4] показали, что эффективность их эксплуатации в условиях шахтной сети энергоснабжения ограниченной мощности возможна при правильном выборе алгоритма пуска на низкую и высокую скорости. При этом параметры алгоритма (последовательность пуска электродвигателей и величины задержек времени) существенно зависят от характеристик конвейера и горнотехнических условий его эксплуатации.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является анализ параметров и характеристик современных забойных скребковых конвейеров и формулирование технических требований для их проектирования и производства на предприятиях ДНР, что обеспечит повышение эффективности работы комплексномеханизированных забоев на шахтах ДНР за счет повышения технического уровня и безопасности эксплуатации забойных скребковых конвейеров, а также позволит исключить их импорт.

Основной материал исследования

На шахтах ДНР используются два типа двухцепных конвейеров: СП – с расположением цепей в боковинах рештаков (рис. 1а); СПЦ – с расположением цепей по центру желоба рештака (рис. 1б).

В конвейерах типа СП достоинством является то, что каждые соседние два скребка и круглозвенные тяговые цепи образуют короб, или ящик, дном которого является днище рештака. В таком коробе размещается большое количество транспортируемого материала достаточно большой крупности. Но при таком расположении цепей в них возникают неодинаковые усилия на участках изгиба става в горизонтальной плоскости – одна цепь натянута больше, другая значительно меньше. Колебания усилий в цепях расшатывают соединения отрезков и ускоряют усталостный износ. Кроме того, при таком расположении цепей увеличение их калибра (для повышения прочности) приводит к увеличению высоты рештачного става, что крайне нежелательно при отработке тонких пластов. Борьба за уменьшение высоты става привела к созданию круглозвенных цепей с вертикальными звеньями пониженной высоты. Эти цепи применяются в конвейерах типа СП26У и СП251.

Устранение неравномерности натяжения цепей и необходимость увеличения прочности цепи (калибра) без увеличения высоты става привели к созданию конвейеров с расположением цепей посередине става. Однако центрально-расположенные цепи имеют также недостатки:

– уменьшается просвет между днищем комбайна и цепями, что приводит к заклиниванию кусков горной массы;

– крупные куски соскальзывают с цепи и падают со става, что уменьшает производительность конвейера;

– влажный и липкий уголь или порода прилипают к цепям при входе на холостую ветвь, что приводит к ее заштыбовке;

– консольная конструкция скребков менее прочная, чем с креплением к цепям по концам.

С целью сохранения преимуществ и устранения недостатков в рассматриваемых двух вариантах расположения цепей было разработано исполнение конвейера с так называемым разнесенным расположением цепей (рис. 1в), при котором цепи выведены из боковин рештаков (что позволяет увеличить прочность цепей за счет увеличения их калибра, но, в то же время, они не сдвинуты вплотную к середине става, а разнесены от продольной оси конвейера на некоторое расстояние).

В скребковых конвейерах, находящихся в эксплуатации на шахтах ДНР, в составе механизированных комплексов могут использоваться все три типа расположения цепей.

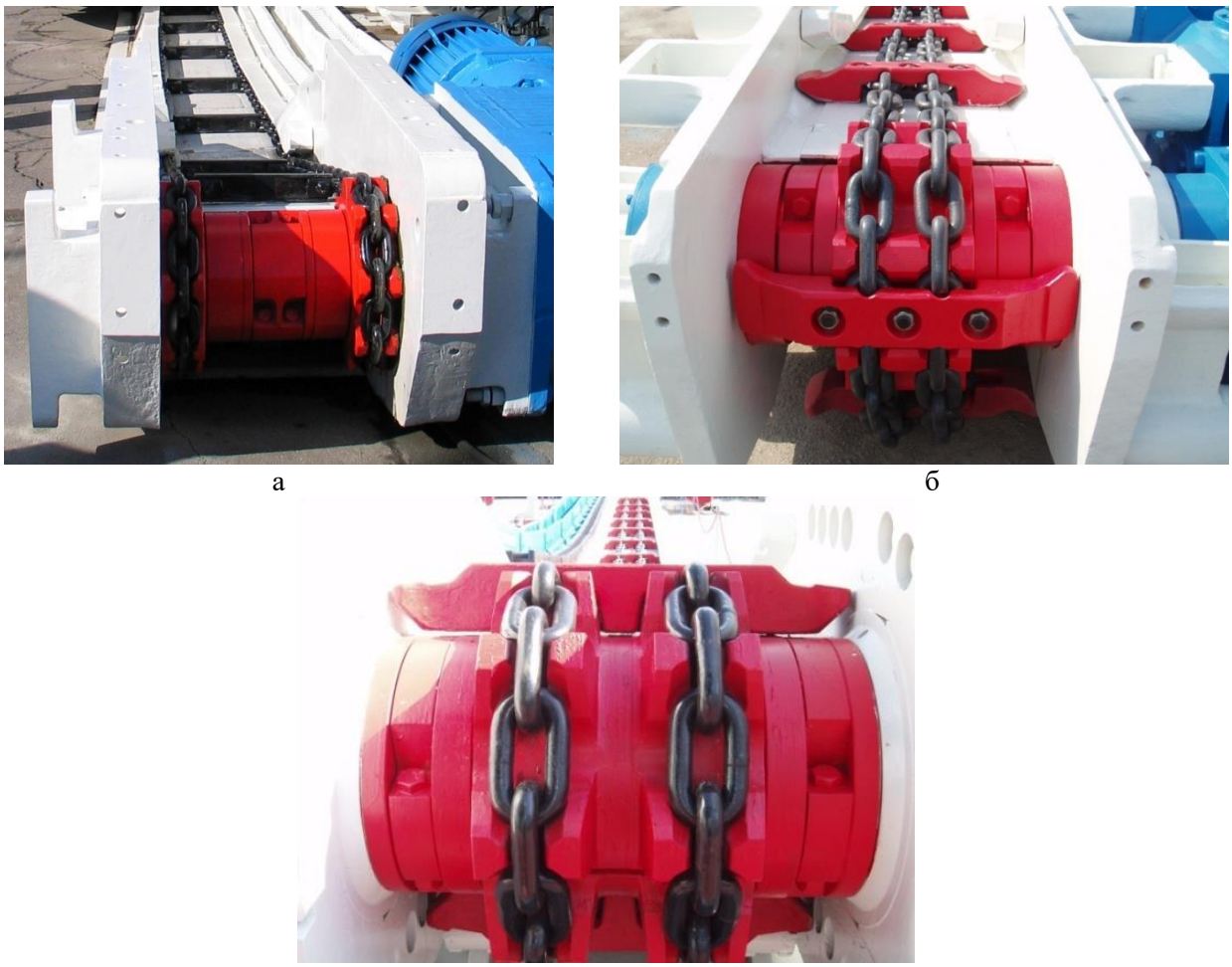
Преобладающее большинство составляют скребковые конвейеры типа СП – 35 шт. из 43 шт. общего количества. Основу парка этих конвейеров составляют: 30 шт. – конвейеры типа СП250, СП251, СП26, СП26У с рештачными ставами на базе спецпрофилей СП190 и СП205. Пять конвейеров типа СП301 и СП326 имеют раштачный став на базе спецпрофиля СП245.

Из 8-ми конвейеров типа СПЦ: 5 конвейеров (2 – типа СПЦ163, 2 – УСТК-2М и 1 – СЗК190) имеют рештачный став на базе спецпрофиля СП192 и 3 конвейера (1 – СП271, 2 – СЗК228) – на базе спецпрофиля СП228.

По скорости движения тягового органа: 33 конвейера типа СП и СПЦ имеют одну скорость, порядка 1 м/сек, а 10 конвейеров, из них 7 – исполнение конвейера СП251.13; 1 – СЗК190 и 2 – СЗК228, имеют две скорости движения тягового органа с соотношением 1:3, которые обеспечиваются двухскоростными электродвигателями.

Двухскоростные конвейеры в 2019 г. применялись только в ГП «Шахта «Комсомолец Донбасса»: 7 конвейеров СП251.13 изготовления АО «Свет шахтера» (Харьков), 3 конвейера типа СЗК производства Чехии. Очистные забои, в которых они применялись, имели самую высокую среднесуточную нагрузку среди предприятий угольной промышленности ДНР.

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



а б в

Рис. 1. Типы забойных скребковых конвейеров по расположению тяговых цепей: *а* – с расположением цепей в боковинах решетаков; *б* – с центрально расположенными тяговыми цепями; *в* – с разнесенным расположением цепей

Наличие двух скоростей (1,1…1,2 м рабочей; 0,37…0,4 м маневровой) позволяет осуществлять с помощью станции управления плавный пуск полностью загруженного конвейера на малой скорости с высоким пусковым моментом, с дополнительным снятием динамических нагрузок за счет эластичной соединительной муфты и торсионного вала в роторе электродвигателя, с последующим переходом на рабочую скорость.

Кроме того, наличие низкой скорости порядка 0,4 м/с позволяет обеспечивать безопасную транспортировку материалов и грузов при помощи конвейера с применением приспособлений и платформ, входящих в комплектацию конвейера.

Следует отметить, что двухскоростные конвейеры имеют повышенную надежность и относительно просты в обслуживании, так как в составе привода отсутствуют ненадежные и сложные в эксплуатации гидромуфты.

Скребковые конвейеры, как правило, имеют от 2-х до 4-х приводных блоков, тип, количество, расположение и суммарная мощность которых определяется горнотехническими условиями применения, а именно: углом падения пласта; длиной очистного забоя; исполнением очистного комбайна по типу подачи; нагрузкой на очистной забой; технологией выполнения концевых операций. Верхний предел суммарной мощности приводов, как правило, ограничивается разрывным усилием цепей тягового органа.

Приводные блоки крепятся болтами к боковинам рамы привода. Крепление блоков фланцевое, подмоторная и подредукторная рамы отсутствуют.

Существует три варианта расположения приводных блоков: продольное (вдоль оси конвейера), поперечное (перпендикулярное оси) и комбинированное.

В случае применения в составе очистного комплекса очистного комбайна с вынесенной системой подачи (ВСП) приводные блоки конвейера располагаются с забойной стороны рамы привода, а блоки привода ВСП – с завальной.

Приводной блок конвейера состоит из редуктора, электродвигателя, устройства плавного

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

пуска и регулировки предельного момента. В односкоростных конвейерах для регулировки пуска и предельного момента используются гидромуфты, а в двухскоростных эти функции выполняет станция управления.

Применение двухскоростного электропривода позволяет при правильном выборе алгоритма запуска значительно снизить динамический удар при переключении скоростей по сравнению с пуском в приводе гидромуфтой, так как запуск конвейера осуществляется на низкой скорости высоким пусковым моментом без удара, в отличие от привода с гидромуфтой, с последующим переходом на рабочую скорость. При этом пусковой ток значительно меньше, чем у односкоростного двигателя. Дополнительное снятие динамических нагрузок при пуске осуществляется, как правило, при помощи эластичной муфты и торсионного вала двигателя.

В скребковых конвейерах в большинстве случаев применяются асинхронные короткозамкнутые двухскоростные двигатели с двумя независимыми обмотками, имеющими соотношение числа пар полюсов (а, значит, угловых скоростей и мощности) 1:3. Переход с низкой скорости на высокую и режим пуска обеспечивается специальными станциями управления, позволяющими контролировать работу до 4-х приводных блоков конвейера одновременно. Современные станции управления конвейерами – это микропроцессорные системы, позволяющие оперативно реализовать любой алгоритм пуска.

На двухскоростных скребковых конвейерах шахтами Украины ранее применялись такие средства управления: взрывобезопасные контакторные пускатели OW-1484R (Польша), пускатели электромагнитные взрывобезопасные типа SN2 (Чехия), устройство управления комплектное взрывозащищенное КСД27.50, устройство управления УКВ650. Также была возможность применения устройства управления комплектного взрывозащищенного рудничного КУУВК-250 и устройства управления комплектного взрывозащищенного КУУВ-500/500.

Однако анализ вышеуказанных существующих средств управления позволяет сделать вывод о том, что на текущий момент нет устройств управления двухскоростными конвейерами, удовлетворяющих всем необходимым условиям (требованиям современной нормативно-технической документации, ГОСТам, наличию оптимальных алгоритмов управления конвейерами) и изготовленных на элементной базе, зарекомендовавшей себя с точки зрения надежности и доступности. Поэтому, в случае освоения производства двухскоростных скребковых конвейеров, необходимо создание новой станции управления модульного типа.

В скребковых конвейерах СП251, СП301, СП326, СПЦ163М, СПЦ271 используются трехступенчатые коническо-цилиндрические редукторы типа БПК160, БП250КЦ, для расположения двигателей параллельно оси става конвейера и цилиндрические для расположения двигателей перпендикулярно оси става конвейера. Корпуса этих редукторов разъемные по оси зубчатых передач, что облегчает сборку и ремонт, но снижает их ресурс. В этих редукторах первая передача коническая, и при использовании в исполнении привода с расположением двигателя перпендикулярно ставу конвейера применяется цилиндрическая проставка, заменяющая коническую ступень редуктора. Для уменьшения габаритов приводных блоков, что сокращает незакрепленное пространство в очистном забое, используются планетарные редукторы – двухступенчатые для расположения привода перпендикулярно ставу конвейера или комбинированные с цилиндро-конической передачей на входе и планетарной ступенью на выходе из редуктора (для расположения привода параллельно ставу конвейера).

В скребковых конвейерах СП26У применяется трехступенчатый унифицированный редуктор в цельном корпусе на мощность 160 кВт. Для приводных блоков с расположением двигателей параллельно ставу используется коническо-цилиндрическое исполнение редуктора, а для блоков с расположением двигателей перпендикулярно ставу – цилиндрическое исполнение редуктора, которое получается заменой конической передачи на цилиндрическую в том же корпусе.

В составе механизированного очистного комплекса базой для перемещения механизированной крепи, очистного комбайна или струга является рештачный став забойного скребкового конвейера. Став состоит из отдельных секций – рештаков. Рештак представляет собой сварную конструкцию коробчатой формы. Боковины выполнены из специального проката, а также могут быть литыми. Конфигурация боковины зависит от типа конвейера по расположению тяговых цепей – разнесенных или центрально-сдвоенных. В конвейерах с разнесенными цепями используются боковины из профилей СП190, СП205, СП245, а с центрально-сдвоенными – СП192, СП228, СПЦ230, 255Д. Цифры в наименовании профилей обозначают их высоту в миллиметрах. Днище рештака, по которому движется рабочая ветвь тягового органа, изготавливается из износостойкого легированного проката. Для увели-

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

чения срока службы рештака на концевые участки днища в зоне движения тяговых цепей, как правило, наплавляется износостойкими сплавами.

Для снижения сопротивления движения холостой ветви, связанного с попаданием под рештак горной массы, а также для увеличения прочности рештака он изготавливается с дополнительным нижним днищем. К боковинам рештака сваркой или болтами крепится навесное оборудование: зачистной лемех для механизированной зачистки почвы после прохода очистного комбайна; дополнительные борты и желоба для укладки кабелей и гидравлических рукавов, в т.ч. при помощи кабелеукладчика; элементы соединения става конвейера с механизированной крепью; реечные цевочные направляющие для бесцепной системы подачи; направляющие для расположения тяговой ветви вынесенной системы подачи; направляющие для перемещения комбайна; желоба для размещения транзитных коммуникаций, проходящих вдоль лавы.

Исполнение рештака с нижним днищем и навесным оборудованием под очистной комбайн с бесцепной системой подачи приведено на рис. 2. В ставах с рештаками с зашитым днищем предусматривается установка специальных инспекционных рештаков с люками для осмотра и обслуживания нижней ветви тягового органа.

Техническое состояние парка забойных скребковых конвейеров на шахтах ДНР требует его модернизации с повышением технического уровня и безопасности их эксплуатации. Для этого необходимо освоить на машиностроительных предприятиях республики выпуск унифицированного типоразмерного ряда конвейеров нового технического уровня и комплектующих изделий (двигателей, аппаратуры управления) к ним.

Анализ конструктивных особенностей находящихся в эксплуатации конвейеров, горно-геологических и горнотехнических условий их применения, проведенный в данной работе, позволяет сформулировать основные направления построения этого ряда:

– по расположению цепей это должны быть конвейеры типа СП и СПЦ;

– по скорости движения тягового органа наиболее предпочтительны двухскоростные с соотношением скоростей 1/3;

– по типу и калибру цепей тяговых органов – цепи 24×86 мм для конвейеров типа СПЦ и 24×86 Н для конвейеров типа СП;

– по рештачным ставам – ставы на базе горячекатаных профилей боковин СП205 для конвейеров типа СП и профилей СП192 для конвейеров типа СПЦ;

– приводные блоки должны быть на базе унифицированных для конвейеров типа СП и СПЦ редукторов – двухступенчатых планетарных для расположения двигателей перпендикулярно ставу конвейера и комбинированных (первая ступень цилиндро-коническая, а вторая планетарная) для расположения двигателей параллельно ставу конвейера;

– элекродвигатели двухскоростные мощностью 55/160 кВт, 65/200 кВт с соотношением скоростей 1/3;

– аппаратура управления на базе станций управления модульного типа;

– конвейеры должны быть укомплектованы приспособлениями для транспортировки материалов и узлов ГШО, включая секции механизированных крепей.

Для решения задачи модернизации парка забойных скребковых конвейеров угледобывающих предприятий республики ГУ «ДОНУГЛЕМАШ» в I-II кв. 2020 г. разработал, согласовал и утвердил в установленном порядке техническое задание на типоразмерный ряд скребковых конвейеров типа СП и СПЦ с двухскоростными приводными блоками мощностью 160, 200 кВт, станцией управления модульного типа и комплектом приспособлений для транспортировки грузов, включая секции механизированных крепей, а ГУ «НИИВЭ» – техническое задание на двухскоростные двигатели мощностью 55/160 кВт, 65/200 кВт.

Разработка конструкторской документации типоразмерного ряда скребковых конвейеров будет завершена во II кв. 2021 г.

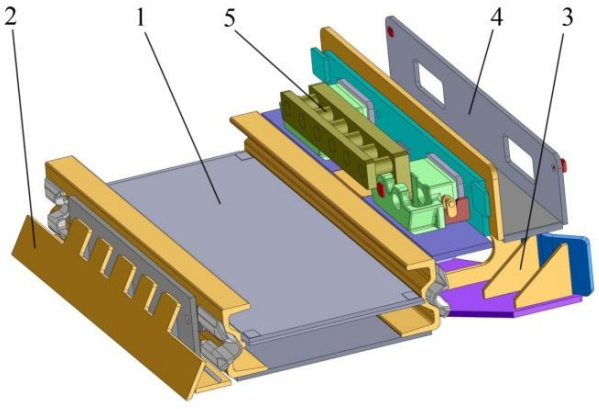


Рис. 2. Рештак забойного скребкового конвейера с навесным оборудованием: *1* – рештак; *2* – зачистной лемех; *3* – балка навесного оборудования; *4* – желоб кабелеукладчика; *5* – рейка бесцепной системы подачи комбайна типа «Эйкотрак»

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

Основные показатели назначения типоразмерного ряда конвейеров типа СП26Д и СПЦ26Д приведены в табл. 1.

Приводной блок скребкового конвейера СП26Д с параллельным расположением двигателя по отношению к ставу (рис. 3) состоит из рамы привода, комбинированного редуктора, упругой предохранительной муфты, двухскоростного двигателя мощностью 55/160 кВт или 65/200 кВт с торсионным выходным валом. Для контроля целостности цепей предусмотрена установка двух датчиков, для контроля режима заклинивания тягового органа – датчик частоты вращения.

Приводной блок скребкового конвейера СПД26 с перпендикулярным расположением двигателя по отношению к ставу приведен на рис. 4.

Основным отличием этого блока является наличие двухступенчатого планетарного редуктора вместо комбинированного, что сокращает площадь приводного блока и, как следствие, площадь незакрепленного пространства при расположении блока привода в лаве.

Планетарный и комбинированный редукторы рассчитаны на мощность 200 кВт и ресурс 15000 часов и будут применяться во всех исполнениях конвейеров СП26Д и СПЦ26Д.

Модульная станция управления должна быть выполнена на современной элементной базе с силовой частью, изготовленной из комплектующих, произведенных в Российской Федерации. Аппаратура управления станции должна быть оснащена энергонезависимой системой регистрации, со съемным носителем данных, иметь информативную систему самодиагностики, позволяющую выявлять и устранять неисправности обслуживающему персоналу, не имеющему высокой квалификации, а также обладать каналом телемеханической связи с диспетчерской системой верхнего уровня, что в настоящее время является одним из обязательных требований.

Табл. 1. Основные показатели назначения

Наименование показателей	Значение показателей	
	СП26Д	СПЦ26Д
1 Область применения: 1.1 Применяемость по углу падения при подвигании забоя, град., не более по простиранию по падению или восстанию	 35 10	
1. Мощность пластов, м	0,8 – 1,9	
1. Механизированные крепи	1КД80, 1КД90, 1КД90Т, 2КД90, КД90Т, 3КД90, 3КД90Т, 1КДД, 2КДД, ДМ	
1. Комбайны	РКУ10, КА80, КА200, 1К101У, РКУ10,УКД200-250, УКД200-500, УКД400	
1.5 Система подачи	цепная, ВСП, БСП	
1.6 Навесное оборудование	НОСПД26	НОСПЦД26
1.7 Рейки	1БСП, РПК, «Эйкотрак»	
1.8 Применяемость комплектов приспособлений для транспортировки вспомогательных материалов и узлов горно-шахтного оборудования, в том числе секций механизированных крепей, по углу падения при подвигании забоя, град., не более по простиранию по падению или восстанию	 20 10	
2. Показатели назначения: 2.1 Производительность расчетная максимальная (пласт пологого падения, длина лавы 200 м), т/мин	 8,8	
2.2 Скорость движения тягового органа, м/с, не менее рабочая маневровая	 1,11 0,37	
2.3 Длина конвейера в поставке, м	до 300	
2.4 Номинальная мощность электродвигателей, кВт	55/160; 65/200	
2.5 Число электродвигателей и расположение приводных блоков	2×55/160; 2×65/200 одностороннее	

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

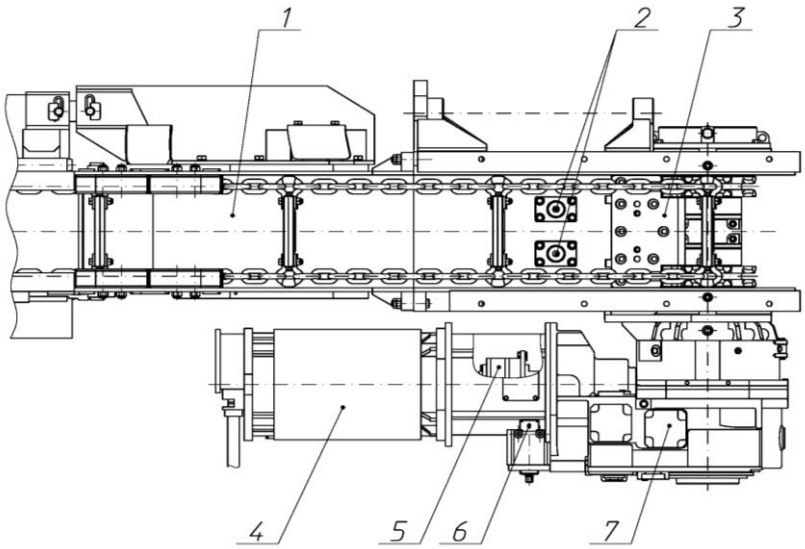


Рис. 3. Приводной блок конвейера СПД 26 с продольным расположением двигателя:
1 – секция переходная; *2* – датчики контроля целостности цепей тягового органа;
3 – рама привода; *4* – электродвигатель ЭКВФ 315М12/4, 55/160 кВт или ЭКВФ 315L12/4,
65/200 кВт; *5* – упругая муфта *FASING*; *6* – датчик частоты вращения;
7 – редуктор цилиндро-коническо-планетарный

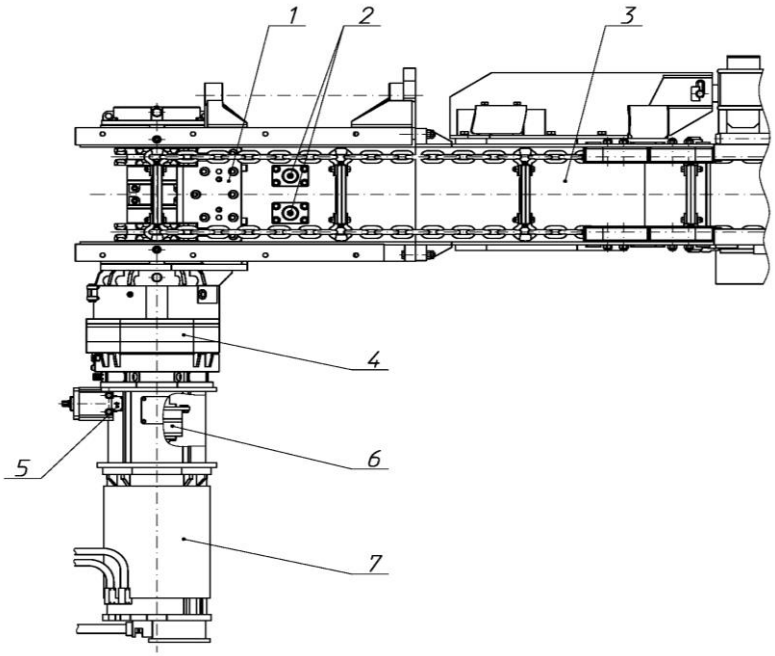


Рис. 4. Приводной блок конвейера СПД 26 с поперечным расположением двигателя:
1 – рама привода; *2* – датчики контроля целостности цепей тягового органа;
3 – секция переходная; *4* – редуктор двухступенчатый планетарный; *5* – датчик частоты вращения;
6 – упругая муфта *FASING*; *7* – электродвигатель ЭКВФ 315М12/4, 55/160 кВт
или ЭКВФ 315L12/4, 65/200 кВт

Помимо этого, в аппаратуре управления будут применены новые схемотехнические решения, позволяющие значительно улучшить помехозащищенность изделия. Особо следует отметить, что используемые в аппаратуре управления схемотехнические решения должны быть выполнены в соответствии с ГОСТ 30852.10-2002 и ГОСТ 31610.11-2014, что позволит эксплуатировать новую модульную станцию на угольных предприятиях Российской Федерации.

Обязательной функцией станции управления должна быть возможность реализации любого заданного алгоритма пуска конвейера. Пусковые режимы многоприводных конвейеров предусматривают определенную последовательность включения электродвигателей головного и хво-

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

стового приводов на низкую и высокую скорости. Обычно на практике в качестве основного алгоритма пуска, например, конвейера КСД27 вне зависимости от условий эксплуатации принимается следующий:

– запуск хвостового электродвигателя на низкую скорость (НС) – X_1, через интервал времени Δt_1 запуск головного на НС – Γ_1;

– через заданное время $t_в$ запуск хвостового электродвигателя на высокую скорость (ВС) – X_2, затем через интервал времени Δt_2 – запуск головного двигателя на ВС – Γ_2.

Условная запись алгоритма $X_1 \rightarrow (\Delta t_1) \rightarrow \Gamma_1 \rightarrow \rightarrow (t_в) \rightarrow X_2 \rightarrow (\Delta t_2) \rightarrow \Gamma_2$. Этот алгоритм и значения интервалов времени устанавливаются, как правило, эмпирически и не учитывают особенности эксплуатации конвейера в конкретном очистном забое: длину, угол и направление транспортирования, степень загрузки и др. Это приводит к неравномерному распределению нагрузки между приводами, ухудшению динамики пуска, увеличению времени переходных процессов, чрезмерно больших значений пусковых токов.

На рис. 5 приведены полученные в представительных шахтных условиях осциллограммы мощности приводных электродвигателей при пуске трехприводного двухскоростного конвейера КСД27. Длина конвейера КСД27 в период замеров составляла 280 м, транспортирование груза производилось практически по горизонтали. На рис. 5 приведены осциллограммы при пуске на НС и переходе на ВС.

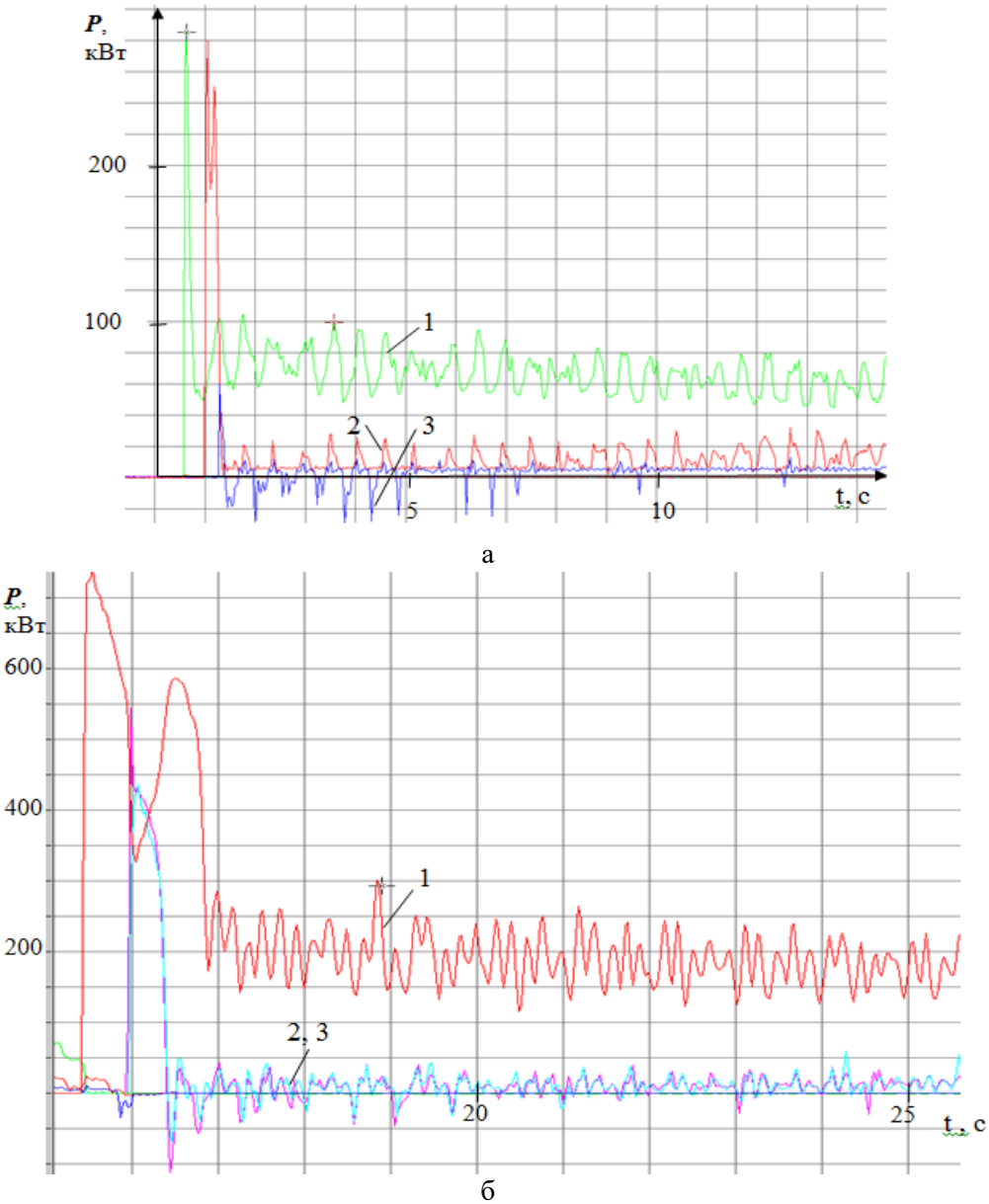


Рис. 5. Осциллограммы мощности *P* электродвигателей трехприводного конвейера:
а – при пуске на низкую скорость; *б* – при переходе на высокую скорость;
1 – хвостовой привод; *2, 3* – головные приводы

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

Как видно из рис. 5, при пуске оба головных электродвигателя практически не нагружены, причем в отдельные периоды времени они работают в генераторном режиме. Выравнивание нагрузки всех двигателей происходит примерно через 50…80 сек.

Таким образом, используемые алгоритмы пуска двухскоростного конвейера в ряде случаев не обеспечивают согласованную работу приводов и требуют корректировки под конкретные горно-геологические условия. Методика определения параметров оптимального алгоритма пуска двухскоростных скребковых конвейеров разработана специалистами ДонНТУ и ГУ «ДОНУГЛЕМАШ» и основывается на проведении вычислительных экспериментов с использованием разработанной математической модели многоприводного двухскоростного конвейера [5…7].

Для обеспечения эффективной эксплуатации разрабатываемых двухскоростных конвейеров необходимо на стадии проектирования выполнить имитационное моделирование переходных режимов пуска конвейеров с целью определения рациональных параметров алгоритма пуска на низкую и высокую скорости. Для этого следует выполнить оценку упругих, инерционных и диссипативных характеристик привода и тягового органа, выполнить вычислительные эксперименты и разработать рекомендации по выбору алгоритма пуска конвейера в зависимости от длины лавы, угла падения пласта, направления транспортирования груза, требуемой производительности.

Комплект приспособлений для транспортировки вспомогательных материалов и узлов горно-шахтного оборудования (рис. 6), в том числе секций механизированных крепей, состоит из платформы для транспортировки секций; щита для погрузки/выгрузки секции; опоры транспортирующей; каретки для транспортировки вспомогательных материалов и узлов ГШО.

Платформа 1 представляет собой металлоконструкцию, состоящую из:

– базовой плиты, имеющей снизу ребра жесткости, опорные лыжи, на которых она перемещается вдоль решетчатого става, и приводные упоры, посредством которых передается тяговое усилие от тягового органа конвейера платформе;

– элементов закрепления платформы на решетчатом ставе конвейера;

– упоров для фиксации транспортируемой секции на платформе.

Каретка 4 представляет собой сварную металлоконструкцию в виде короба, закрытого с трех сторон. Один из продольных торцов каретки закрыт подвижной крышкой, изменяя положение которой можно регулировать степень закрытости каретки и ее полезный объем.

С внешней стороны внизу каретки установлены опорные лыжи, элементы для привода ее в движение и фиксации на решетчатом ставе. На боковинах каретки предусмотрены места для фиксации (увязки) транспортируемых грузов.

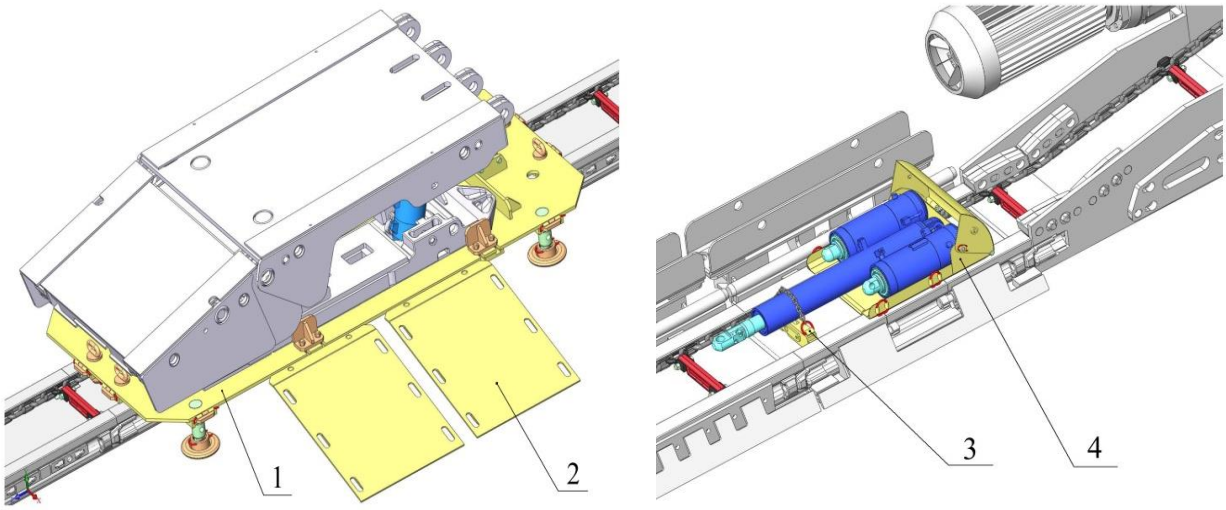


Рис. 6. Устройства для транспортировки вспомогательных материалов и узлов ГШО, в том числе секций механизированных крепей:
1 – платформа для транспортировки секций механизированных крепей;
2 – щит для погрузки-выгрузки секции; *3* – опора транспортирующая;
4 – каретка для транспортировки вспомогательных материалов и узлов ГШО

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

Выводы

Для повышения эффективности работы и безопасности эксплуатации комплексно-механизированных забоев на шахтах ДНР необходимо произвести модернизацию парка скребковых конвейеров за счет замены находящихся в эксплуатации и комплектации вновь вводимых лав конвейерами типоразмерного ряда СП26Д и СПЦ26Д с двухскоростными приводными блоками мощностью 55/160 кВт, 65/200 кВт, станциями управления модульного типа и комплектом приспособлений для транспортировки материалов и узлов ГШО.

Внедрение конвейеров типа СП26Д и СПЦ26Д на угольных предприятиях республики позволит:

– повысить нагрузку на очистной забой за счет увеличения его длины, обеспеченного запуском на низкой скорости, и снижения удельного расхода времени на выполнение концевых операций;

– значительно снизить объемы тяжелого ручного труда и времени на выполнение работ по транспортировке материалов и узлов горношахтного оборудования, включая секции механизированных крепей в процессе эксплуатации и проведения монтажно-демонтажных работ, а также повысить безопасность их выполнения за счет применения комплекта приспособлений и осуществления транспортирования на малой скорости;

– повысить ресурс приводных блоков, узлов рештачного става и тяговых органов за счет снижения динамических нагрузок при пусках, особенно загруженного конвейера, на малой скорости;

– снизить эксплуатационные расходы за счет сокращения затрат на проведение текущих ремонтов и регламентных работ по обслуживанию.

Для обеспечения эффективной эксплуатации новых двухскоростных конвейеров целесообразно с использованием разработанных ГОУ ВПО «ДонНТУ» и ГУ «ДОНУГЛЕМАШ» математических моделей и программного обеспечения для конкретных условий эксплуатации определять оптимальный алгоритм пуска на низкую и высокую скорости.

Освоение серийного производства забойных скребковых конвейеров СП26Д и СПЦ26Д с комплектующим оборудованием к ним позволит загрузить машиностроительные предприятия ДНР выпуском, в том числе на экспорт, конкурентоспособной продукции нового технического уровня.

Список литературы

1. Научно-техническое сопровождение работ в области механизации основных технологических процессов угледобычи, оказание технической помощи при изготовлении, ремонте, модернизации и внедрении горно-шахтного оборудования, исследование режимов работы и технического состояния горных машин, разработка нормативно-технических документов и оперативных технико-технологических мероприятий по устранению аварийных ситуаций и негативных факторов, влияющих на стабильность добычи угля, его качество, себестоимость и условия труда подземного персонала: Отчеты о НИР / ГУ «ДОНУГЛЕМАШ», № ГР 118D000074; Инв.№ А/0009. – Донецк, 2019. – 182 с., Инв.№ А/0053 – Донецк, 2020. – 75 с.
2. Косарев, И.В. Инновационные направления в создании горно-шахтного оборудования, обеспечивающего повышение эффективности добычи угля // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2016. – №6(6). – С. 12-18.
3. Выполнить научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы по разработке типоразмерного ряда скребковых конвейеров типа СП и СПЦ с двухскоростными блоками привода энерговооруженностью 2х55/160 кВт, 2х65/200 кВт со станцией управления модульного типа и комплектом приспособлений для транспортировки вспомогательных материалов и узлов горно-шахтного оборудования, в том числе секций механизированных крепей: Отчет о НИР / ГУ «ДОНУГЛЕМАШ», № ГР 0120D000028; Инв.№ А/0055. – Донецк, 2020. – 104 с.
4. Кондрахин, В.П. Многокритериальный подход к обоснованию алгоритма запускаемого привода забойного скребкового конвейера с двухскоростными электродвигателями / В.П. Кондрахин, Ю.А. Зубова, Е.Л. Ткаченко // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. – 2014. – Вип.1(27). – С. 150-161. (серія: гірничо-електромеханічна).
5. Математическая модель для исследования нагрузок в двухскоростном многодвигательном приводе и тяговом органе скребкового забойного конвейера / В.П. Кондрахин [и др.] // Наукові праці ДонНТУ. – 2008. – Вип.16(142). – С. 141-148. (серія: гірничо-електромеханічна).
6. Novel approach to and implementation of design and analysis of armored face conveyor power train / R. Nie [et al.] // Science China Technol. Sci. – 2015. – No.12. Vol.58. – P. 2153-2168.
7. Świder, J. Dynamic analysis of scraper conveyor operation with external loads / J. Świder, K. Herbuś, K.Szewerda // MATEC Web of Conferences 94, 01009 (2017). https://doi.org/10.1051/matecconf/20179401009

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

I.V. Kosarev, A.V. Meznikov, A.E. Volotov
State Institution «Donetsk Research, Design and Experimental Institute for Complex Mechanization of Mines» (State Institution «DONUGLEMASH») (Donetsk)
V.P. Kondrakhin /Dr. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

IMPROVING TECHNICAL LEVEL AND SAFETY OPERATION OF FACE SCRAPER CONVEYORS

Background. *To ensure the effective operation of face scraper conveyors, it is necessary to provide high-quality capital repairs at specialized enterprises and carry out work on developing high-level scraper conveyors in production with the solution of issues of improving the safety of their operation.*
Materials and/or methods*. The structure of the fleet of conveyors that are in operation at the Donetsk People's Republic (DPR) mines in 2019, when working out layers with a capacity of 0.85…1.62 m, is determined, and an analysis of their design features are made: the type of conveyor arrangement of the traction chains; the calibre of the chain traction body; power drive units; conveyor drive design drive units; design of gears; pan rack design, including the type of pan rack sidewall; design of control stations.*
Results. *The technical condition of the park of face scraper conveyors at the DPR mines requires its modernization. To do this, it is necessary to master the production of a unified standard-sized series of conveyors of a new technical level and components (engines, control equipment) for them at machine-building enterprises of the Republic.*
The main directions for building this series:
– by the location of chains-conveyors of the SP and SPC type;
– according to the speed of movement-two-speed with a speed ratio of 1/3;
– chains 24×86 mm for conveyors of the SPC type and 24×86 N for conveyors of the SP type;
– pan racks based on hot-rolled profiles of sidewalls SP205 for conveyors of the SP type and profiles SP192 for conveyors of the SPC type;
– drive units must be based on unified gearboxes;
– two-speed electric motors with a power of 55/160 kW, 65/200 kW and a speed ratio of 1/3;
– control equipment based on modular control stations with the possibility of implementing any start-up algorithm;
– conveyors must be equipped with a set of devices for transporting materials and components of mining equipment.
Conclusion. *To improve the efficiency and safety of operation of complex-mechanized faces in the mines of the DPR, it is necessary to modernize the fleet of scraper conveyors by replacing the currently in operation and completing the newly introduced faces with conveyors of the standard-sized SP26D and SPC26D series with two-speed drive units with a capacity of 55/160 kW, 65/200 kW, modular control stations and a set of devices for transporting materials and mining units.*

Keywords: *scraper conveyor, drive unit, pan rack, safety, control station, starting modes.*

Сведения об авторах

И.В. Косарев
Телефон: +380 (71) 331-29-27
Эл. почта: gu.donuglemash@yandex.ru

А.Е. Волотов
Телефон: +380 (71) 317-28-77
Эл. почта: dgum-mtp@yandex.ru

А.В. Мезников
ORCID iD: 0000-0003-2679-4630
Телефон: +380 (71) 344-74-40
Эл. почта: gu.donuglemash@yandex.ru

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

Статья поступила 24.12.2020 г.
© И.В. Косарев, А.В. Мезников, А.Е. Волотов, В.П. Кондрахин, 2020
Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев

УДК 622.284

И.В. Косарев, А.В. Мезников, А.В. Коваленко
ГУ «Донецкий научно-исследовательский проектно-конструкторский институт комплексной механизации шахт» (Донецк)

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ КЛАПАНОВ ШАХТНЫХ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КРЕПЕЙ

Рассмотрены направления улучшения и исследования технических параметров предохранительных клапанов, обеспечивающих увеличение несущей способности механизированных крепей и безопасности работы очистных забоев.

***Ключевые слова**: механизированная крепь, предохранительный клапан, расходная характеристика, гистерезис.*

Постановка проблемы

Все современные механизированные крепи, составляющие основу комбайновых и струговых комплексов, а также очистных агрегатов для подземной добычи полезных ископаемых, являются гидрофицированными. Для механизации процессов поддержания и управления кровлей в призабойном пространстве очистного забоя, передвижки и удержания в заданном положении забойного оборудования при отработке пологих и наклонных пластов в составе механизированных комплексов применяется механизированная крепь поддерживающе-оградительного типа. Гидравлическая система управления механизированной крепью состоит из насосной станции, гидрокоммуникаций, силовой гидравлики и управляющей гидроаппаратуры. Управляющая гидроаппаратура механизированной крепи имеет многокомпонентную структуру, элементы которой выполняют функционирование и защиту элементов гидрооборудования крепи, а также их управление. Управляющая гидроаппаратура функционально выполняет управление элементами силовой гидравлики (гидростойка, гидродомкрат), распределение потоков рабочей жидкости на секции крепи при выполнении рабочих операций по креплению очистного забоя, передвижке секций, передвижке забойного конвейера, защиту полостей гидростоек, гидродомкратов от перегрузки и обеспечение заданной несущей способности секции крепи, запирание магистральных и соединительных трубопроводов секций крепи.

Скорость и надежность крепления очистных забоев являются одними из основных критериев, определяющих эффективность работы очистных забоев, безопасность ведения работ и экономические показатели угледобывающих предприятий в целом. Эмульсионная управляющая гидроаппаратура является определяющей в данных показателях. В настоящее время к гидроаппаратуре механизированных крепей возросли требования к эксплуатационной надежности, эргономичности и ремонтопригодности.

Кроме того, за последние годы на угледобывающих предприятиях Донецкой Народной Республики ухудшилось техническое состояние механизированных крепей, особенно управляющей гидравлики, что ведет за собой некачественное крепление очистных забоев, ухудшение качества угля, увеличение времени аварийных простоев, что в итоге приводит к снижению объемов добываемого угля.

В связи с вышеизложенным, назрела потребность создания и освоения серийного производства на территории Донецкой Народной Республики надежной, эргономичной эмульсионной аппаратуры управления механизированными крепями с улучшенными расходными характеристиками, что позволит повысить скорость и надежность крепления очистного забоя, эффективность работы добычных лав, безопасность ведения очистных работ на угледобывающих предприятиях ДНР и ЛНР.

Анализ последних исследований и публикаций

На угледобывающих предприятиях ДНР и ЛНР в качестве предохранительных клапанов защиты силового гидрооборудования и гидрокоммуникаций механизированных крепей используются клапаны типа ГВТН, КПС, КП39. Данные клапаны по разработкам института «Донгипроуглемаш» серийно выпускает ПАО «Днепропетровский агрегатный завод» и ООО «Укрспецналадка». Данные предприятия находятся на территории Украины, что значительно усложняет логистику доставки гидроаппарату-

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

ры. Кроме этого, данная гидроаппаратура была разработана в начале 90-х годов прошлого века и не удовлетворяет как новым требованиям эксплуатации, так и техническим требованиям со стороны объекта управления.

В 2000-х годах специалисты института «Донгипроуглемаш» предпринимали попытки по созданию предохранительных клапанов с лучшими параметрами [1…4], однако данные решения не нашли практического воплощения. В то же время зарубежные аналоги, например предохранительные гидроклапаны с открытой пружинной камерой № 210604 и №210660 фирмы ОНЕ (Германия), обладают характеристиками, значительно превосходящими клапаны, находящиеся в серийном производстве [5].

Цель (задачи) исследования

Целью исследований является поиск конструкторских решений и исследование режимов работы нового предохранительного клапана, позволяющих улучшить его технические параметры.

Основной материал исследования

Одним из значимых изделий гидроаппаратуры, участвующих в управлении секцией, является клапан предохранительный. Клапан предохранительный (далее по тексту – клапан КПД) предназначен для обеспечения заданного рабочего уровня давления в поршневой полости (первоначального распора) и защиты гидростойки секции шахтной механизированной крепи от перегрузки (открытие клапана для сброса давления и его последующее закрытие) при оседании кровли. Таким образом, предохранительный клапан в гидросистеме секции механизированной крепи защищает гидростойку от механического разрушения избыточным давлением, возникающим в результате горного давления на перекрытие крепи, путем автоматического выпуска необходимого объема рабочей жидкости из системы в атмосферу или в общую систему крепи.



Рис. 1. Общие виды клапанов предохранительных КПД и КПС

Наиболее близким аналогом исследуемому клапану КПД является серийный предохранительный клапан типа КПС (общие виды клапанов представлены на рис. 1), так как он является пружинным клапаном прямого действия. Важнейшими элементами конструкции клапана являются пружина, позволяющая настраивать давление срабатывания, седло запорного устройства и золотник. После срабатывания клапана и снижения давления под действием усилия пружины запорное устройство закрывается и происходит герметизация клапана.

Характеристики пружины и запорного устройства имеют главное значение в параметрах клапана – от них зависит осуществление полного закрытия клапана в номинальных границах давления и минимальное снижение границ диапазона герметизации при срабатывании.

Исследования режимов работы предохранительных клапанов проводились на аттестованных стендах лаборатории исследования режимов работы горных машин, с использованием штатного оборудования: установки для испытания предохранительных клапанов (аттестат № ИО-5036), устройства УДМ, насосной станции СНТ-32. В ходе проведения исследований использовались визуальные измерительные приборы (манометры стрелочные, мерная емкость, секундомер, линейка) и регистрирующее оборудование (измерительная система ЛИС-4А, многоканальный регистратор TOPAS 1020, ПЭВМ, датчики давления). В качестве датчиков давления применялись тензометрические манометры типа ТДДМ с рядом номинальных значений 6,0 МПа и 60 МПа. Тарировка датчиков производилась с помощью грузопоршневого манометра МП600 (аттестат № СП-046489). Скорость регистрации режимов работы проводилась с дискретностью 0,2 с, в быстропротекающих режимах – 0,05 с.

Схема подключений при испытаниях клапана предохранительного показана на рис. 2, общий вид установки для испытания предохранительных клапанов представлен на рис. 3.

Посредством насоса Н (см. рис. 2) на испытываемый предохранительный клапан КП подавалось давление до его срабатывания. После срабатывания клапана, которое фиксировалось прибором регистрации данных ПРД, а также визуально по манометру МН, подача давления прекращалась, при этом давление, подведенное

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

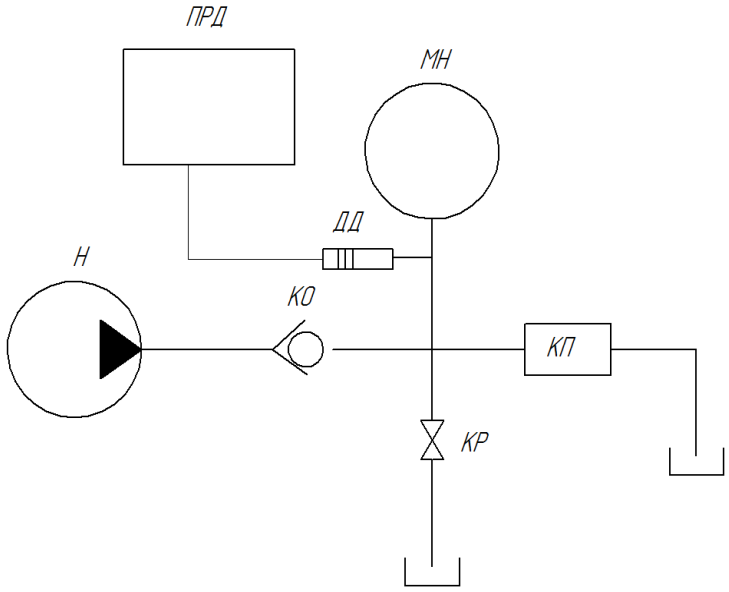


Рис. 2. Схема подключений при испытаниях клапана предохранительного:
ДД – датчик давления; *КП* – клапан предохранительный; *КО* – клапан обратный;
КР – кран разгрузки клапана; *МН* – манометр; *Н* – насос;
ПРД – прибор регистрации данных TOPAS1020

к клапану, отсекалось обратным клапаном КО. Давление срабатывания клапана фиксировалось прибором регистрации данных типа ПРД посредством датчика давления. После отключения насоса и герметизации клапана фиксировалось давление, при котором произошла герметизация. Клапан считался герметичным, если в течение 3-х минут отсутствовало падение давления.

В ходе исследований, при необходимости, в конструкцию создаваемого клапана типа КПД вносились изменения, на последующем этапе проверялась эффективность внесенных изменений.

Диаграмма давления при срабатывании предохранительного клапана КПД представлена на рис. 4.

По диаграммам давлений предохранительного клапана КПД определены фактические значения срабатывания, герметизации клапана и его гистерезис, вычислены средние значения. Результаты измерений давлений срабатывания и герметизации клапана КПД сведены в табл. 1.



Рис. 3. Общий вид установки для испытания предохранительных клапанов

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

Для сравнительного анализа рабочих характеристик создаваемого клапана КПД и серийного клапана КПС были проведены измерения давлений срабатывания клапана КПС. Диаграмма срабатывания предохранительного клапана КПС представлена на рис. 5, результаты сведены в табл. 2.

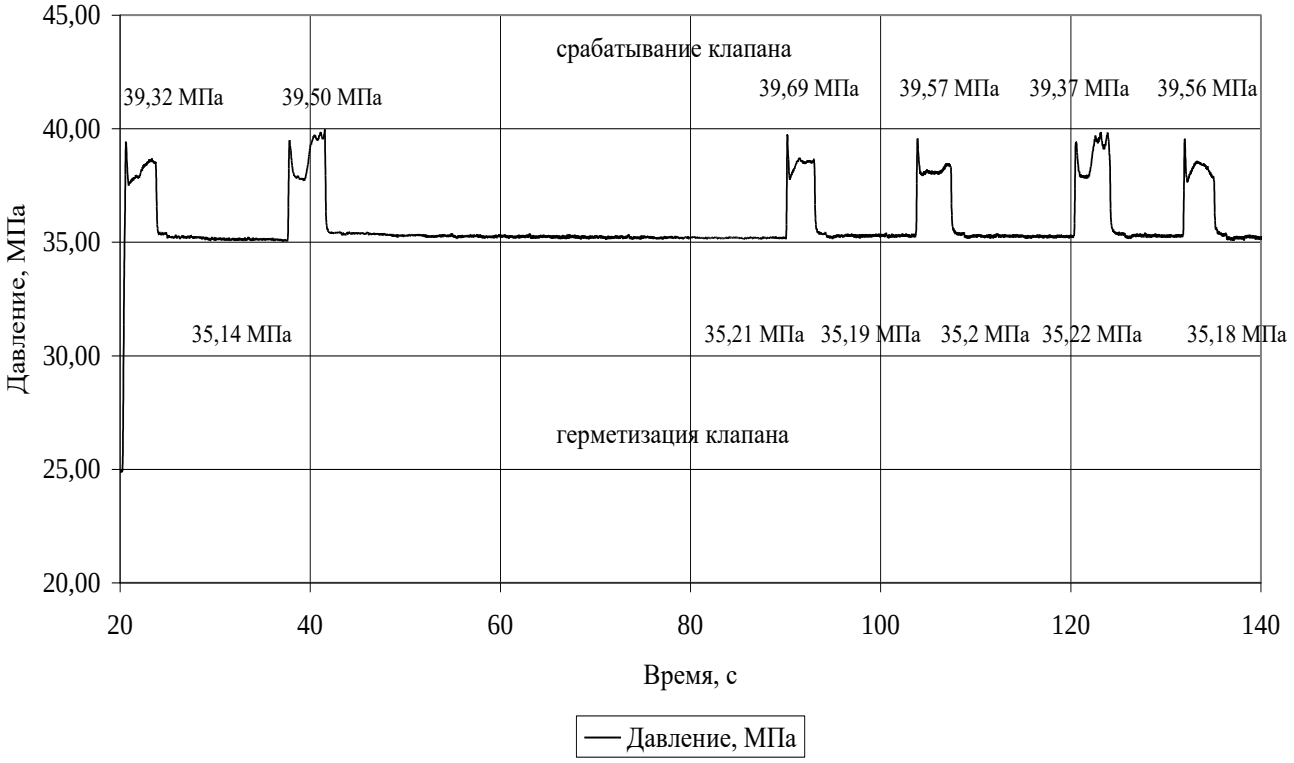


Рис. 4. Диаграмма давления при срабатывании предохранительного клапана КПД: фрагмент диаграммы записи режима

Табл. 1. Результаты измерений давлений срабатывания и герметизации клапана КПД

№ опыта	Давление срабатывания, МПа	Давление герметизации, МПа	Гистерезис, %
1	39,32	35,14	10,6
2	39,50	35,21	10,9
3	39,69	35,19	11,3
4	39,57	35,20	11,0
5	39,37	35,22	10,5
6	39,56	35,18	11,1
Среднее значение	39,50	35,19	10,9

Табл. 2. Результаты измерений давлений срабатывания и герметизации клапана КПС

№ опыта	Давление срабатывания, МПа	Давление герметизации, МПа	Гистерезис, %
1	39,1	33,42	14,5
2	38,87	32,98	15,2
3	39,15	33,3	14,9
4	38,77	33,06	14,7
Среднее значение			14,8

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

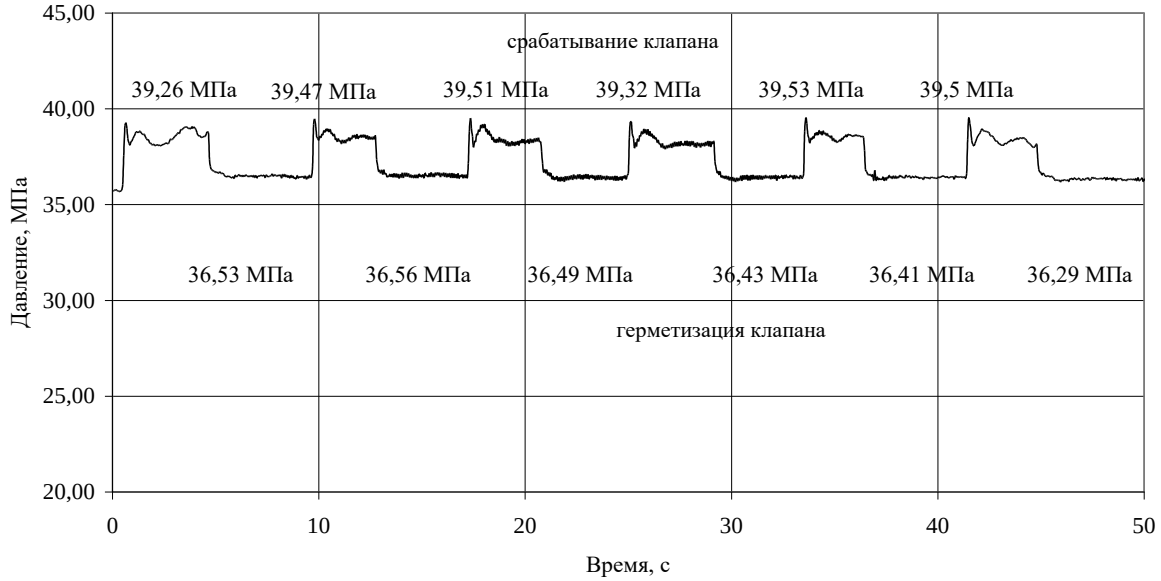


Рис. 5. Диаграмма срабатывания клапана КПС

Как видно из табл. 1, среднее значение гистерезиса создаваемого клапана КПД составляет 10,9 %, что значительно лучше гистерезиса серийного клапана КПС (14,8 %, табл. 3). Улучшения данного параметра удалось добиться изменением конструкции седла (развернуты внутренние диаметры деталей, увеличен сектор седла до 120° и углублено отверстие).

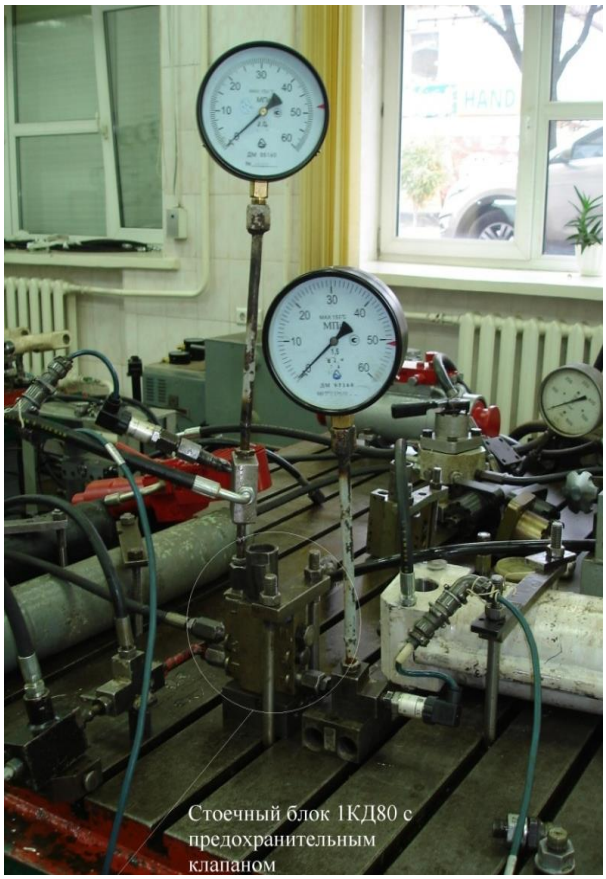


Рис. 6. Общий вид стенда измерения номинального расхода клапанов

Не менее важной характеристикой предохранительного клапана является его пропускная способность.

Первоначально были проведены сравнительные исследования по замеру расхода клапанов КПД и КПС при срабатывании (режим перехода от открытого к герметичному состоянию).

Данный режим определяет скорость нарастания расхода клапана (импульсная характеристика) – скорость реагирования клапана на внешнее возмущение и его реакцию (сброс давления), что особо важно для защиты гидростойки секции шахтной механизированной крепи от перегрузки.

Для исследования данной характеристики клапаны устанавливались в стоечный блок 1КД80, к которому были подключены элементы гидравлической схемы. Перед измерениями производилась настройка исследуемых клапанов на давление срабатывания 38…40 МПа.

При превышении давления в защищаемой полости происходило срабатывание предохранительного клапана путем пропускания (сбрасывания) рабочей жидкости, объем которой замерялся.

Давление предохранительных клапанов, превышающее уставку, создавалось посредством диагностического устройства УДМ. Время срабатывания клапанов определялось как среднее арифметическое за циклы измерений каждого клапана. Общий вид стенда измерения расхода клапанов в сборе со стоечным блоком 1КД80 представлен на рис. 6. Диаграммы скорости нарастания расхода клапанов КПС и КПД представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

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

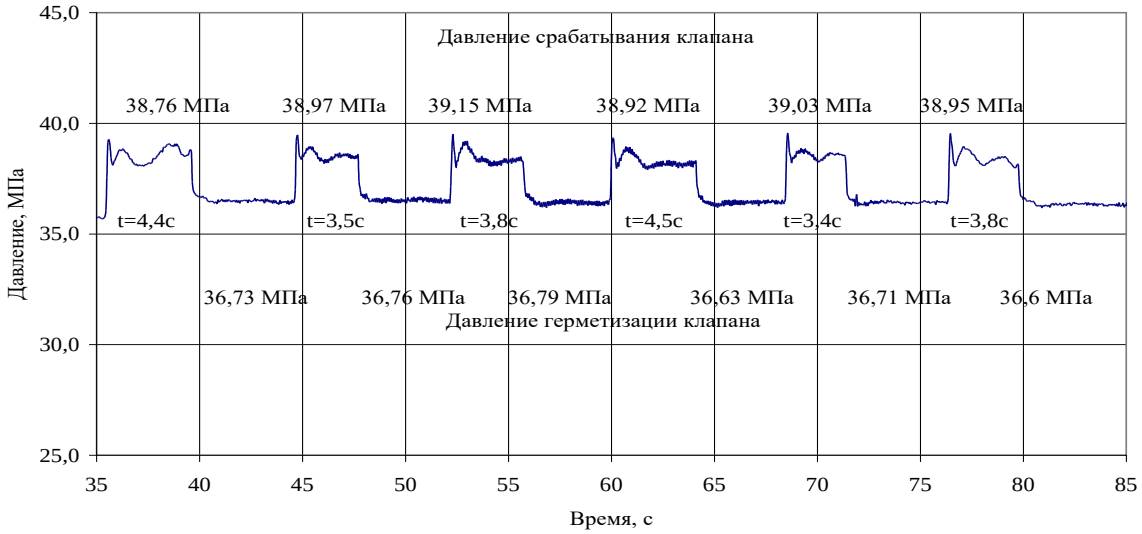


Рис. 7. Диаграмма скорости нарастания расхода клапана КПС

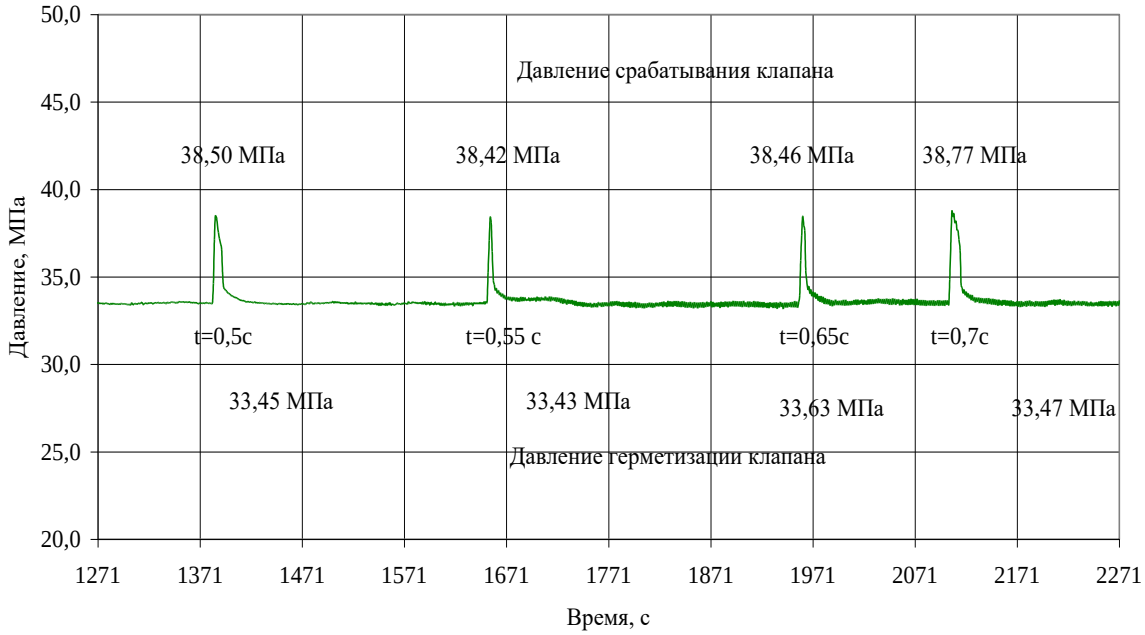


Рис. 8. Диаграмма скорости нарастания расхода клапана КПД

Из рисунков видно, что время срабатывания клапана КПС в среднем составило 3,9 с, а КПД – 0,6 с, при этом объем «сброшенной» жидкости клапаном КПС составил около 0,043 мл (скорость расхода 0,011 мл/с), а клапана КПД – 0,0112 мл (скорость расхода 0,019 мл/с). Таким образом, скорость расхода создаваемого клапана КПД по сравнению с серийным клапаном КПС выше почти в 2 раза.

Следующим важным параметром предохранительного клапана является его максимальный расход, т.к. именно он защищает гидростойку от механического разрушения избыточным давлением, созданным горным давлением и проседанием консоли перекрытия крепи.

В связи с тем, что лабораторная насосная станция СНТ-32 по своим техническим параметрам не может создать необходимый расход жидкости (не менее 100 л/мин при давлении 45…50 МПа), измерение максимального расхода проводилось путем замены пружины клапана на вставку, обеспечивающую полное открытие клапана (золотника) и замера объема сброшенной жидкости в мерную емкость. Проведенные замеры показали, что максимальный расход предохранительного клапана КПС составил 9,5 л/мин, клапана КПД – 62,8 л/мин (при давлении перед клапаном 10 МПа). Используя данный результат, аналитически-расчетным способом [6] был определен максимальный расход клапана КПД, который составляет около 90 л/мин. Данный показатель клапана КПД в 6,6 раза превышает максимальный расхода клапана КПС.

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

Выводы

При проведении исследований режимов работы созданного предохранительного клапана КПД выявлено, что по сравнению с серийно выпускаемым клапаном КПС гистерезис уменьшен на 26 %, улучшена импульсная характеристика клапана, максимальный расход увеличен более чем в 6 раз.

Полученные результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о создании предохранительного клапана нового технического уровня, конструкция которого позволила улучшить его технические параметры, что в результате приведет к лучшей защите полостей гидростоек и гидродомкратов от перегрузки, обеспечению заданной несущей способности секции и повышению надежности работы гидравлической системы управления механизированной крепью.

Список литературы

1. Мезников, А.В. Типоразмерный ряд стоечных предохранительных клапанов КПК нового технического уровня / А.В. Мезников, А.С. Карпенко, С.Р. Брызнев // Уголь Украины. – 2011. – №7. – С. 33-36.
2. Пат. № 47809 Украины, МПК F15B13/02, E21D23/16. Клапан гидравлический / Варшавский Ю.И., Косарев В.В., Мезников А.В., Стадник Н.И., Трусов М.В. – № u 2009 08843; заявл. 25.08.09; опубл. 25.02.10.
3. Пат. № 53041 Украины, МПК F16K17/04, E21D15/00. Клапан предохранительный / Косарев В.В., Стадник Н.И., Мезников А.В., Варшавский Ю.И., Карпенко А.С. – № u 2010 02234; заявл. 01.03.10; опубл. 12.09.10.
4. Пат. № 90434 Украины, МПК E21D 15/51, F16K 17/04. Клапан предохранительный / Белик В.Н., Косарев И.В., Мезников А.В., Варшавский Ю.И., Карпенко А.С. – № u 201315381; заявл. 27.12.13; опубл. 26.05.14.
5. Системы управления механизированными крепями и гидравлические компоненты: каталог. – ОНЕ Maschinenbau GMBH, 2014. – 13 с.
6. Ковалевский В.Ф., Справочник по гидроприводам горных машин / В.Ф. Ковалевский, Н.Т. Железняков, Ю.Е. Бейлин. – М.: Недра, 1967. – 336 с.

I.V. Kosarev, A.V. Meznikov, A.V. Kovalenko
State Institution «Donetsk Research, Design and Experimental Institute for Complex Mechanization of Mines» (Donetsk)

RESEARCH OF TECHNICAL PARAMETERS OF SAFETY VALVES OF MINE MECHANIZED SUPPORTS

Background. *To ensure more efficient operation and work safety in the treatment faces, which will affect the economic performance of coal mining enterprises as a whole, it is necessary to create reliable, ergonomic emulsion control equipment for mine mechanized supports with improved consumption characteristics. Besides, the enterprises of the Donetsk People's Republic have not yet mastered the mass production of control hydraulics products, but they are being repaired, which affects their reliability during operation.*

Materials and/or methods. *Studies of the operating modes of safety valves were carried out on certified specialized stands, using hydraulic devices and standard equipment. The TOPAS 1020 multichannel recorder connected to a personal computer was used as the measuring and recording equipment.*

Results. *The conducted studies of the operating modes of the new level safety valve, in comparison with the KPS type safety valve, in terms of the values of the actual actuation, hysteresis, throughput, as well as the maximum flow rate, have shown that:*

– the average hysteresis value of the created KPD safety valve is 10.9 %, which is significantly better than the hysteresis of the serial KPS valve (14.8 %);

– the rate of increase in the flow rate of the created KPD safety valve, in comparison with the serial KPS valve, is almost 2 times higher;

– the maximum flow rate of the KPD safety valve (about 90 l/min) is 6.6 times higher than the maximum flow rate of the KPS valve.

Conclusion. *The obtained results allow concluding that a new technical level safety valve has been created, the design of which has improved its technical parameters, which will lead to better protection of the cavities of hydraulic racks and hydraulic jacks from overload, ensuring the specified load-bearing capacity of the section and increasing the reliability of the hydraulic control system for mechanized support.*

Keywords: *mechanized support, safety valve, flow characteristic, hysteresis.*

Сведения об авторах

И.В. Косарев
ORCID iD 0000-0002-1396-4306
Телефон: +380 (62) 300-31-25
Эл. почта: donuglemash@mail.ru

А.В. Мезников
ORCID iD 0000-0003-2679-4630
Телефон: +380 (62) 300-31-21
Эл. почта: donuglemash@mail.ru

А.В. Коваленко
Телефон: +380 (71) 362-75-04
Эл. почта: donuglemash@mail.ru

Статья поступила 10.12.2020 г.
© И.В. Косарев, А.В. Мезников, А.В. Коваленко, 2020
Рецензент д.т.н., проф. К.Н. Маренич



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

УДК 331.4(075.32)

В.А. Пенчук /д.т.н./, Н.А. Юрченко
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (Макеевка)
В.В. Пенчук
ООО «Дана ЛТД» (Макеевка)

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И РЕСУРСА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН НА БАЗЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Вопросы безопасности и ресурса грузоподъемных машин рассматриваются через призму применения цифровых технологий в существующих и перспективных методах управления охраной труда.

***Ключевые слова**: охрана труда, ресурс грузоподъемных машин, срок службы, рабочее место, крановщик.*

Постановка проблемы

Управление безопасностью и охраной труда осуществляется органами законодательной и исполнительной власти. Основным органом государственного надзора и контроля за состоянием грузоподъемных машин и безопасной их эксплуатацией являются органы Госгортехнадзора. На предприятиях, как правило, задействуют системы управления охраной труда, которая направлена на выполнение государственных нормативных требований охраны труда. В соответствии с ГОСТ 12.0.230-2007 «Система стандартов безопасности труда. Система управления охраной труда. Общие требования» оценка состояния охраны труда и безопасной эксплуатации и разработка мероприятий по их повышению были и будут актуальными.

Анализ последних исследований и публикаций

При проектировании грузоподъемных машин принимаются конкретные условия эксплуатации и режимы их нагружения, закладываются начальные количественные значения факторов безопасности и охраны труда. Процессы, происходящие в системе «крановщик – грузоподъемная машина – среда взаимодействия» («Кр – Гм – Св»), разнообразны и многие из них имеют деградационный характер. Особенно это важно учитывать, так как нормативный срок службы грузоподъемных машин составляет 15…30 лет [1]. После завершения нормативного срока эксплуатации многие владельцы грузоподъемных машин по разным причинам принимают решение о продлении срока их эксплуатации.

Возможность дальнейшей эксплуатации принимается на основе экспертизы специализированной организации, которая детально проверяет состояние металлоконструкций, узлов и деталей грузоподъемной машины. Методики обследования и порядка продления срока службы этих машин базируются в основном на результатах исследований усталостной прочности и долговечности деталей и узлов с учетом времени и режимов их нагружения [2,3].

Проблемы здоровья работников и охраны труда – неотъемлемая часть стратегии многих стран [4,5]. Рассматривая и анализируя факторы, обеспечивающие безопасность эксплуатации грузоподъемных кранов, авторы работы [6] отмечают, что наибольшее влияние имеет человеческий фактор, в частности, оператор крана.

Многие работы посвящены анализу основных причин аварий, случающихся при эксплуатации грузоподъемных кранов [7…9].

Представляет интерес опыт в вопросах охраны труда Великобритании, Германии, Финляндии и США [10].

Еще в 2004 году в Великобритании была принята Стратегия безопасности здоровья на рабочих местах. В Стратегии выделяются следующие направления: развитие партнерства, оказание поддержки работникам в получении преимуществ от эффективного управления охраной труда и безопасностью на рабочих местах; развитие культуры безопасного труда и ответственности за здоровье работников; работа комиссий по охране труда, направленная на снижение травматизма и риска повреждения здоровья на рабочих местах; распространение стратегического видения (установление двухсторонних коммуникаций со всеми заинтересованными сторонами) [11].

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является обосно-

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

вание эффективности применения цифровых технологий в процессах повышения безопасности и ресурса грузоподъемных машин.

Основной материал исследования

В рамках современной концепции МС ИСО серии 9000 определение, анализ и контроль расходов на качество охраны труда должны быть базовыми элементами системы управления качеством охраны труда на предприятии.

В указанном документе отсутствует системный анализ причин ухудшения технического состояния грузоподъемной машины с учетом условий ее эксплуатации, квалификации и состояния здоровья крановщика.

Впервые системный подход «крановщик – грузоподъемная машина – среда взаимодействия» предложен в работе [12]. На рис. 1 приведена упрощенная модель системы «Кр – Гм – Св», в которой показано взаимодействие факторов, определяющихся состоянием и здоровьем крановщика (Кр), состоянием грузоподъемной машины (Гм) и параметрами и условиями среды взаимодействия (Св).

В указанных связях 1, 2, 3, 4, 5 и 6 возможны следующие процессы: передача информации J_i, передача энергии E_i и передача некоторой массы m_i.

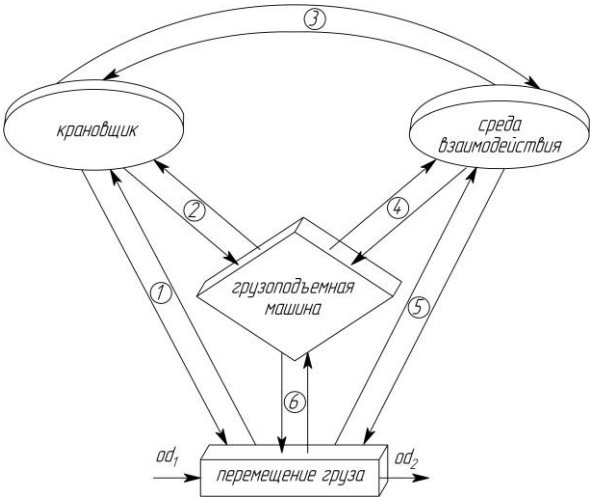


Рис. 1. Взаимосвязи системы «Кр – Гм – Св»: *1* – взаимодействие крановщика с процессом перемещения груза; *2* – взаимодействие крановщика с рычагами управления грузоподъемной машины; *3* – взаимодействие крановщика с окружающей средой; *4* – связи грузоподъемной машины с окружающей средой; *5* – взаимосвязь окружающей среды с процессами перемещения грузов; *6* – реализация функций грузоподъемной машины; od_1 – первоначальное положение груза, od_2 – положение груза после его перемещения

При конкретном анализе необходимо учитывать, что в некоторых связях может отсутствовать тот или иной процесс.

В виде матрицы эти взаимосвязи можно представить следующим образом:

$$\begin{array}{l} 1.\ I_1,\ E_1,\ m_1, \\ 2.\ I_2,\ E_2,\ m_2, \\ 3.\ I_3,\ E_3,\ m_3, \\ 4.\ I_4,\ E_4,\ m_4, \\ 5.\ I_5,\ E_5,\ m_5, \\ 6.\ I_6,\ E_6,\ m_6. \end{array} \qquad (1)$$

Анализом можно показать и объяснить наличие конкретных количественных характеристик (I, E, m) в каждой из указанных связей. Например, в связи 1 – «крановщик – перемещение груза» имеется визуальная информация о процессе перемещения груза $I_1 \neq 0$; передача энергии от крановщика к процессу перемещения груза отсутствует, поэтому $E_1=0$, передача массы от крановщика непосредственно процессу перемещения груза также отсутствует, поэтому $m_1=0$.

Аналогичный анализ можно провести для каждой из шести указанных связей системы «Кр – Гм – Св» и записать:

$$\begin{array}{l} 1.\ I_1 \neq 0,\ E_1 = 0,\ m_1 = 0, \\ 2.\ I_2 \neq 0,\ E_2 \neq 0,\ m_2 = 0, \\ 3.\ I_3 \neq 0,\ E_3 \neq 0,\ m_3 \neq 0, \\ 4.\ I_4 \neq 0,\ E_4 \neq 0,\ m_4 \neq 0, \\ 5.\ I_5 = 0,\ E_5 = 0,\ m_5 \neq 0, \\ 6.\ I_6 \neq 0,\ E_6 \neq 0,\ m_6 \neq 0. \end{array} \qquad (2)$$

Как видно из рис. 1 и данных (1) и (2), в безопасном функционировании системы «Кр – Гм – Св» задействованы все ее элементы, некоторые факторы этого взаимодействия особенно влияют на безопасность и ресурс элементов системы (табл. 1).

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

Табл. 1. Факторы, влияющие на безопасность и ресурс функционирования системы «крановщик – грузоподъемная машина – среда взаимодействия»

Крановщик	Грузоподъемная машина	Среда взаимодействия
1	2	3
1. Профессиональные знания ($x_{к1}$)	1. Незапланированный повышенный износ узлов и деталей ($x_{гр1}$)	1. Отсутствие должной квалификации у обслуживающего персонала ($x_{ср1}$)
2. Наличие (или отсутствие) практических навыков организации безопасного труда ($x_{к2}$)	2. Напряженные режимные нагружения грузоподъемной машины ($x_{гр2}$)	2. Просадки и перекос подкрановых путей ($x_{ср2}$)
3. Не имеет необходимых знаний для работы на данном типе грузоподъемной машины ($x_{к3}$)	3. Несоблюдение регламента технического обслуживания ($x_{гр3}$)	3. Условия на рабочем месте крановщика (запыленность, загазованность, шум, вибрация, эргономические показатели) ($x_{ср3}$)
4. Не имеет четких инструкций в поведении в экстремальных условиях ($x_{к4}$)	4. Нестандартное поведение узлов и механизмов в специфических условиях эксплуатации ($x_{гр4}$)	4. Воздействие метеорологических явлений (ливень, снег, гроза, обледенение и т.д.) ($x_{ср4}$)
5. Не может выполнять свои функции из-за физического или психологического состояния ($x_{к5}$)	5. Нарушение регулировок механизмов крана в процессе его эксплуатации ($x_{гр5}$)	5. Несвоевременные и некачественные проверки состояния эргономических показателей кабин, сидения, лестниц и т.д. ($x_{ср5}$)
	6. Подъем груза с подхватом, приводящим к динамическим нагрузкам на отдельные узлы ($x_{гр6}$)	6. Несовременная нормативная база по эксплуатации, ремонту грузоподъемных машин ($x_{ср6}$)
	7. Пыль и окалины, попадающие в узлы сопряжения и вызывающие механический износ ($x_{гр7}$)	
	8. Изменение механических свойств изоляционных материалов кабелей, электроприводов от длительного воздействия высокой температуры ($x_{гр8}$)	
	9. Разложение изоляции из поливинилхлоридных пластиков при $t^\circ > 145^\circ \div 160^\circ C$ ($x_{гр9}$)	
	10. Снижение характеристик горюче-смазочных материалов при высоких температурах ($x_{гр10}$)	

Данные табл. 1 наглядно показывают, что причиной небезопасных условий эксплуатации грузоподъемных механизмов является не только их состояние, но и ошибки крановщиков, которые чего-то не учли или пренебрегли предусмотренными средствами защиты. Человеческий фактор имеет важнейшее значение как в сфере безопасного управления грузоподъемными ма-

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

шинами, так и в сфере оперативного и эффективного технического обслуживания, обеспечения и соблюдения качества и сроков проведения планово-предупредительного обслуживания.

Все элементы системы «Кр – Гм – Св» имеют объективные причины для изменения, деградации своих количественных показателей.

Если крановщик работает на грузоподъемном кране несколько лет, то его физиологические показатели могут изменяться. С годами человек (оператор) стареет, также меняются факторы грузоподъемной машины, определяющие охрану труда крановщика.

Наглядным примером являются обследования состояния грузоподъемных кранов совместно со специалистами по оценке их технического состояния и специалистов по охране труда. Согласно существующей нормативной базе [2] специализированной организацией было дано разрешение на продление сроков эксплуатации мостовых кранов практически без учета факторов охраны труда.

Примером могут служить некоторые результаты обследования мостовых кранов на предприятиях Донбасса, в которых вообще не обследуются причины деградации факторов охраны труда: состояние стекол в кабине крановщика, состояние противоскользящих насечек на поверхностях движения крановщика и др.

Согласно нормативной документации ГОСТ РИСО 11112-2012 кресло для крановщика должно иметь соответствующую виброзащиту и устройства, регулирующие его высоту, положение спинки (рис. 2).

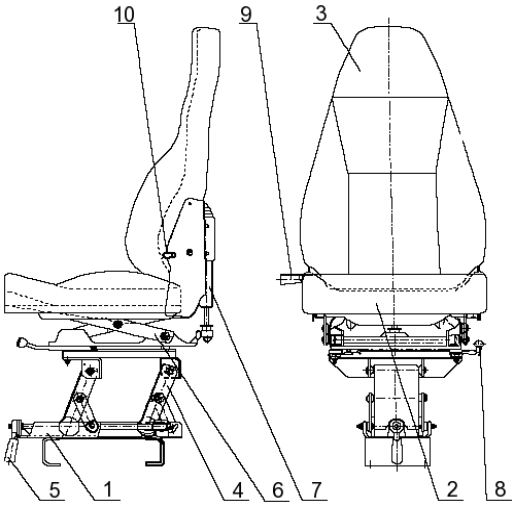


Рис. 2. Схема кресла, рекомендуемого ГОСТ РИСО 11112-2012:
1 – салазки; *2* – сиденье; *3* – спинка; *4* – рычаги, регулирующие высоту сиденья;
5 – механизм перемещения кресла; *6* – рычаги сиденья; *7* – пневмогаситель вибрации;
8 – механизм смещения сиденья; *9* – механизм регулирования положения спинки;
10 – фиксатор спинки

В реальных условиях имеет место установка обычных металлических стульчиков (рис. 3а) или винтовой сварной конструкции (рис. 3б).

Такое отношение к вопросам охраны труда объясняется следующим: на территории Донецкой Народной Республики пока еще действует система Аттестации рабочих мест по условиям труда (АРМ) [13]. Согласно АРМ аттестация рабочих мест необязательна и проводится по желанию владельца грузоподъемной машины.

В Российской Федерации в 2013 г. принято Постановление о внедрении с 1.01.2019 г. системы Специальной оценки условий труда (СОУТ) [14]. По уже действующей в России системе СОУТ оценка состояния любой машины или оборудования проводится планово один раз в три года и обязательно только специализированной организацией.



а



б

Рис. 3. Конструкции кресел крановщика, фактически используемые на грузоподъемных кранах

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

Табл. 2. Изменения состояний в элементах системы «Кр – Гм – Св»

Осмотры крановщика специалистами:	$t_1^{кр}$	$t_2^{кр}$	$t_3^{кр}$
офтальмологом	$К_{кр1}^{оф}$	$К_{кр2}^{оф}$	$К_{кр3}^{оф}$
невропатологом	$К_{кр1}^{н}$	$К_{кр2}^{н}$	$К_{кр3}^{н}$
отоларингологом	$К_{кр1}^{о}$	$К_{кр2}^{о}$	$К_{кр3}^{о}$
электрокардиологом	$К_{кр1}^{э}$	$К_{кр2}^{э}$	$К_{кр3}^{э}$
другими			
Техническое освидетельствование крана:	$t_1^{гм}$	$t_2^{гм}$	$t_3^{гм}$
состояние крюка	$К_{ТО1}^{кр}$	$К_{ТО2}^{кр}$	$К_{ТО3}^{кр}$
состояние канатов	$К_{ТО1}^{к}$	$К_{ТО2}^{к}$	$К_{ТО3}^{к}$
состояние металлоконструкций	$К_{ТО1}^{м}$	$К_{ТО2}^{м}$	$К_{ТО3}^{м}$
состояние грузоподъемного механизма	$К_{ТО1}^{гм}$	$К_{ТО2}^{гм}$	$К_{ТО3}^{гм}$
другие			
Оценка условий труда:	$t_1^{УТ}$	$t_2^{УТ}$	$t_3^{УТ}$
температурный режим	$К_{t1}^{УТ}$	$К_{t2}^{УТ}$	$К_{t3}^{УТ}$
вибрация на рабочем месте	$К_{в1}^{УТ}$	$К_{в2}^{УТ}$	$К_{в3}^{УТ}$
состояние остекления кабины	$К_{ос1}^{УТ}$	$К_{ос2}^{УТ}$	$К_{ос3}^{УТ}$
шумовые нагрузки в кабине	$К_{ш1}^{УТ}$	$К_{ш2}^{УТ}$	$К_{ш3}^{УТ}$
другие			

В передовых странах мира существует система обязательных плановых проверок: медицинское освидетельствование крановщиков (один раз в три года); техническое освидетельствование грузоподъемной машины (частичное не реже одного раза в 12 месяцев и полное не реже одного раза в три года) и специальная оценка условий труда (через три года).

Реально существует четкая система наблюдения и оценки изменения количественных параметров каждого из элементов системы «Кр – Гм – Св».

Старение крановщика – это старение человека, рассматривается как биологический процесс. Постепенную деградацию некоторых органов и движений человека – оператора грузоподъемной машины можно выявить при плановом медицинском осмотре крановщика (табл. 2).

Деградацию технических решений по охране труда на грузоподъемной машине, таких как состояние кресел, состояние кабины, рычагов управления, противоскольжения площадок и других выявляют при проведении очередных СОУТ. Состояние элементов грузоподъемных машин (канатов, крюков, механизмов подъема и передвижения и т.д.) – при проведении очередного технического обслуживания.

Многие предприятия и организации в разных сферах деятельности переходят на цифровые технологии, особенно в сфере бумажных отчетов и хранения на них соответствующей информации.

Переход на электронные документы в сфере медицинского обслуживания крановщиков, технического освидетельствования грузоподъемных машин, специальной оценки условий труда крановщиков позволяет накапливать и сохранять данные в табулированном виде. Для системы «Кр – Гм – Св» старше 10 лет можно получить конкретные данные об изменении состояний каждого из ее элементов (табл. 2).

При электронном накоплении данных табл. 2 прогнозирование момента наступления предельного состояния *i*-го конкретного фактора из системы «Кр – Гм – Св» возможно при решении следующего уравнения:

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

$$Y(x_i) - \Delta x_i = 0, \qquad (3)$$

где $Y(x_i)$ – функция деградационного отклонения характеристического фактора x_i системы «Кр – Гм – Св»; Δx_i – допустимое количественное отклонение некоторого фактора x_i.

Для каждого из параметров (см. табл. 1) можно составить соответствующие уравнения:

$$\begin{cases} K_{кр}^{оф}(t) = A^{оф}t^2 + B^{оф}t + C^{оф}, \\ K_{кр}^{н}(t) = A^{н}t^2 + B^{н}t + C^{н}, \\ K_{кр}^{э}(t) = A^{э}t^2 + B^{э}t + C^{э}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} K^{кр}(t) = A^{кр}t^2 + B^{кр}t + C^{кр}, \\ K^{к}(t) = A^{к}t^2 + B^{к}t + C^{к}, \\ K^{м}(t) = A^{м}t^2 + B^{м}t + C^{м}, \\ K^{гм}(t) = A^{гм}t^2 + B^{гм}t + C^{гм}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} K^{t}(t) = A^{t}t^2 + B^{t}t + C^{t}, \\ K^{ос}(t) = A^{ос}t^2 + B^{ос}t + C^{ос}, \\ K^{ш}(t) = A^{ш}t^2 + B^{ш}t + C^{ш}. \end{cases} \qquad (4)$$

Решение представленных задач (4) сводится к определению значений соответствующих коэффициентов A_i, B_i и C_i. В программу конкретного грузоподъемного крана заранее закладывается математическая модель решения подобных задач методом наименьших квадратов. Обработка результатов практических замеров (см. табл. 2) позволяют для каждого из факторов системы «Кр – Гм – Св» получить свои уравнения регрессии, которые будут показывать скорость его деградации и оставшийся ресурс.

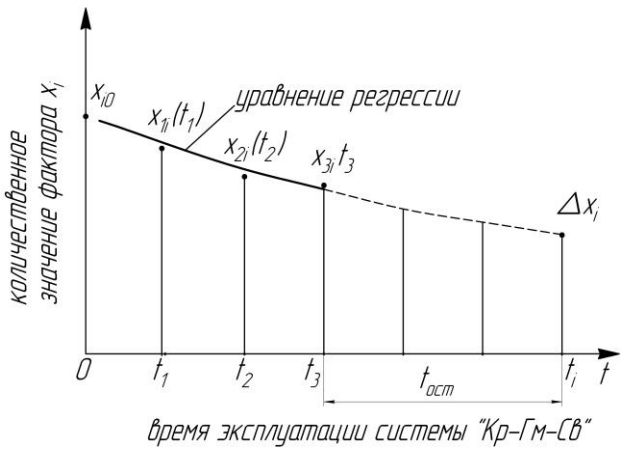


Рис. 4. Зависимость фактора x_i системы «Кр – Гм – Св» от времени и его ресурс

Например, для параметра x_i имеем как минимум три временные точки измерения в соответствии с регламентом. По зависимостям (4) составляется соответствующее уравнение регрессии.

На рис. 4 показаны количественные показатели фактора x_i при плановых проверках (t_1; t_2; t_3). После трех плановых проверок устанавливается уравнение регрессии и при известном допускаемом значении фактора Δx_i остаточный ресурс $t_{ост}$ фактора x_i.

Таким образом, для любого фактора безопасной эксплуатации крана, используя цифровую информацию, можно установить остаточный срок эксплуатации крана до достижения его предельного значения факторов любого элемента системы «Кр – Гм – Св».

Выводы

Во всех передовых странах мира оказывают особое внимание вопросам безопасности и охраны труда, особенно при использовании таких сложных машин, как грузоподъемные краны.

В XXI веке сложилась ситуация, когда для безопасной эксплуатации системы «крановщик – грузоподъемная машина – среда взаимодействия» введены обязательные и плановые проверки состояния всех элементов.

Использование цифровых технологий позволяет создать базу данных о состоянии элементов системы «Кр – Гм – Св» в определенном порядке, позволяющем проводить их анализ и создавать уравнения регрессии, описывающие поведение факторов безопасности и охраны труда.

Использование цифровой информации для обработки экспериментальных данных о состоянии каждого из элементов системы «Кр – Гм – Св» позволяет оперативно устанавливать их остаточный ресурс и прогнозировать дальнейшую эффективную эксплуатацию.

Список литературы

1. РосТест: сертификационный центр: сайт. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования» (ТР ТС 010/2011). – Москва, 2010. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rostest.net/
2. НЦТД-ПС01-07. Указания по экспертному обследованию подъемных сооружений с истекшим сроком безопасной эксплуатации – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/471813639
3. Техэксперт: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации РД 10-525-03. Рекомендации по проведению испытаний грузоподъемных машин. –

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

Санкт-Петербург, 2010. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200031040
4. Yu, Y.H. Forensic investigation on crane accidents / Int. J. Forensic Engineering. – 2017. – No.4. Vol.3. – P. 319-341.
5. Skiba, R. Best Practice Standards and Methodology for Crane Operator Training //A Global Perspective Journal of Transportation Technologies. – 2020. – No.10. – P. 265-279.
6. Shapira, A. Identification and Analysis of Factors Affecting Safety on Construction Sites with Tower Cranes / A. Shapira, B. Lyachin // Journal of Construction Engineering and Management. – 2009. – No.135. – P. 24-33.
7. Короткий, А.А. Обоснования безопасности грузоподъемных кранов / А.А. Короткий, Е. В. Егельская, А.П. Шерстюк // Вестник Донского гос. техн. ун-та. – 2017. – №4. Т.17. – С. 136-14.
8. Анализ аварийности и травматизма при эксплуатации грузоподъемных машин и механизмов в России / Ю.И. Булыгин и др. // Безопасность техногенных и природных систем. – 2018. – №3-4. – С. 2-17.
9. Поветкина, П.Н. Анализ аварийности и травматизма при работе с грузоподъемными механизмами / П.Н. Поветкина, Е.А. Хамидуллина // XXI век. Техносферная безопасность. – 2018. – №3(4). – С. 40-50.
10. Система охраны труда в Германии: ОТиСЗ плюс. – 2013. – №9. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: //http://gigabaza.ru/doc/5578.html
11. Охрана труда Россия: Всероссийское объединение специалистов по охране труда. Опыт в Великобритании в сфере охраны труда. – Москва, 2020. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://vosot.ru/ot_uk.html
12. Пенчук, В.А. Повышение безопасности работ и охрана труда на грузоподъемных машинах, используемых на поверхности угледобывающих предприятий / В.А. Пенчук, В.Н. Гусаков, Н.А. Юрченко // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. – 2019. – №1(44). – С. 65-73.
13. Государственная информационная система нормативных правовых актов Донецкой Народной Республики. Порядок проведения аттестации рабочих мест по условиям труда на территории Донецкой Народной Республики. – Донецк, 2016. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://gisnpa-dnr.ru/npa/0003-7-25-20160531/
14. Техэксперт: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: сайт. Приказ от 24 января 2014 года № 33н Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации «Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению». – Санкт-Петербург, 2010. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/499072756

V.A. Penchuk /Dr. Sci./, N.A. Yurchenko
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (Makeyevka)
V.V. Penchuk
Limited Liability Company «Dana LTD» (Makeyevka)

IMPROVING THE SAFETY AND RESOURCE OF LIFTING MACHINES BASED ON DIGITAL TECHNOLOGIES

Background. *When extending the service life of lifting cranes, little attention is paid to occupational safety issues. The operation of an «old» machine is already an additional risk for service personnel. Still, it is not envisaged to consider the degradation of occupational safety factors in the methodological recommendations for extending the service life.*
Materials and/or methods. *When considering the issues of labour protection and safety in the operation of lifting cranes, it is necessary to take into account all the elements of the process: «crane operator – lifting machine – interaction environment» («Co – Lm – Ie»). A simplified model of this system is presented, which shows the interaction of factors determined by the state and health of the crane operator, the state of the lifting machine and the parameters and conditions of the interaction environment.*
A detailed analysis of the interaction factors shows that all of them affect the machine's safety of operation to a greater or lesser extent. All elements of the system («Co – Lm – Ie») have objective reasons for changes, degradation of their quantitative indicators: the crane operator's physiological indicators change, the lifting cranes' technical condition changes, the working conditions at the workplace change

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

for the worse. If the changing indicators of the first two components of the system are checked: during a medical examination at crane operators and at lifting cranes during a technical examination, then the change in working conditions is recorded only when the workplace is certified at the request of the crane owner. For example, the crane operator's chair is taken: the design version on the new crane and its substitutes on the «old» crane in the form of an ordinary chair or a homemade welded type.

Results. *Recording the data of parameter changes in the system («Co – Lm – Ie») on electronic documents will allow creating appropriate equations for each of the parameters and predict the rate of its degradation and the remaining resource.*

Conclusion. *The use of digital technologies allows you to accumulate information about the state of system elements («Co – Lm – Ie») in a certain order, which allows you to analyze them and create regression equations that describe occupational safety behaviour and health factors.*

Keywords: *labour protection, resource of lifting machines, service life, workplace, crane operator.*

Сведения об авторах

В.А. Пенчук
SPIN-код: 7969-6475
Author ID: 582447
ORCID iD: 0000-0002-2258-6618
Телефон: +380 (71) 430-18-83
Эл. почта: penshyk@rambler.ru

Н.А. Юрченко
Телефон: +380 (71) 359-83-05
Эл. почта: Rovina-na@rambler.ru

В.В. Пенчук
Телефон: +380 (71) 430-18-83
Эл. почта: penshyk@rambler.ru

Статья поступила 15.12.2020 г.
© В.А. Пенчук, Н.А. Юрченко, В.В. Пенчук, 2020
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин



УДК 669.187.2:621.365.22

А.Я. Бабанин /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (Макеевка)
Б.Ф. Белов /к.т.н./, А.Я. Минц, И.А. Абакумов
ГП «Юзовский металлургический завод» (Донецк)

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ ПОЛУПРОДУКТА В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ИЗ МЕТАЛЛОШИХТЫ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ОКИСЛОВ ЖЕЛЕЗА

На основании проведенных исследований разработана технология ведения плавки в дуговой сталеплавильной печи для переработки металлической шихты с повышенным содержанием окислов железа. Предложен механизм формирования печного шлака с высокой рафинировочной способностью, а также механизм его рафинировочных действий на основе структурно-химического состояния основных компонентов шлака и их сегрегаций. Предложенный механизм позволяет управлять процессом формирования активированного печного шлака и значительно повысить его рафинирующее действие.

Ключевые слова: *дуговая сталеплавильная печь, металлическая шихта, окислы железа.*

Постановка проблемы

Региональные мини-металлургические предприятия, построенные для переработки скопившегося металлического лома, работают, как правило, в сложных производственных условиях и имеют ряд особенностей, основными из которых являются:

– работа дуговой сталеплавильной печи (ДСП) на металлической шихте с повышенным содержанием окислов железа;

– ведение технологического процесса плавки с дефицитом необходимых шлакообразующих материалов, десульфураторов и флюсов.

Это в совокупности сопровождается увеличением длительности плавки и приводит к значительному повышению себестоимости производимой металлопродукции. К таким заводам следует отнести мини-металлургические предприятия, находящиеся в отдаленных районах России, а также в Донецкой Народной Республике.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ публикаций, направленных на решение данной проблемы, свидетельствует о некоторых теоретических проработках ее решения [1]. Известно, что основу образующегося в ДСП шлака при работе на металлошихте с повышенным содержанием окислов железа составляют высокожелезистые силикаты кальция. Именно окислы железа определяют степень окисленности шлака и значительно снижают его рафинировочную способность к удалению серы [2,3].

Теоретически установлено, что в процессе плавки продукты протекающих реакций окисления и присаживаемые шлакообразующие вступают во взаимодействие с образованием промежуточных фаз (силикаты кальция, вюстит-фазы), а соотношение в них компонентов определяется по диаграмме состояния FeO-SiO_2-CaO [4].

Следует отметить, что выше представленные теоретические разработки являются основой для практического решения поставленной задачи, в частности, для разработки оптимальной технологии выплавки полупродукта в ДСП при высоком содержании окислов железа в металлошихте и при ресурсосбережении дорогостоящих шлакообразующих материалов.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка технологии выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи с учетом высокого содержания окислов железа в металлической шихте для снижения затрат на дорогостоящие рафинировочные шлаковые смеси и флюсы.

Основной материал исследования

Представленные в данной работе результаты были получены в процессе проведения исследований на ГП «Юзовский металлургический завод». Выплавку стали марок Ст3сп и Ст4сп проводили в соответствии с действующей технологической инструкцией выплавки полупродукта в дуговой сталеплавильной печи ДСП-2 емкостью 120 тонн системы Danark и с дальнейшей внепечной доводкой металла на установке «ковш-печь».

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

Особенностью исследуемых промышленных плавок является применение в завалку металлического лома с высоким содержанием окислов железа и чугунного скрапа («козлы» шлаковых чаш и чугуновозных ковшей), загрязненного в дополнение к окислам железа еще и доменным шлаком. Это значительно ухудшало эффективность десульфурации стали в печи и приводило к сложностям получения заданного марочного содержания серы в готовом металле, а, следовательно, к дополнительным затратам по доводке металла на установке «ковш-печь».

Результаты исследования шлакового режима серии промышленных плавок с повышенным содержанием окислов железа в металлошихте, выполненного по пробам металла, отобранным из печи в период плавления, представлены в табл. 1.

Анализ полученных данных по 11-ти серийным промышленным плавкам свидетельствует о том, что содержание окислов железа в печном шлаке значительно превышает технологические нормы ведения плавки в дуговой сталеплавильной печи. Среднее значение содержания окислов железа находится на уровне 37,0 %, а поплавочное содержание окислов железа в шлаке изменяется в диапазоне от 32,1 до 45,2 %.

По визуальным наблюдениям, такой печной шлак очень жидкоподвижен, не вспенивается, и дуговая сталеплавильная печь работает в режиме открытых дуг. Существенным недостатком режима работы открытых дуг являются значительные потери тепла от дуг в атмосферу печи, что ухудшает нагрев металла и, следовательно, увеличивает длительность плавки и окисленность металла от его взаимодействия с переокисленным шлаком и взаимодействия его открытой поверхности с кислородом атмосферы печи. Кроме того, такие высокожелезистые шлаки характеризуются низкой рафинировочной способностью, в частности, к удалению серы из металла. Содержание основных компонентов $CaO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3$ в пересчете на трехкомпонентную систему составляет соответственно, %: 50,98-38,01-10,72.

На основании проведенных исследований, для улучшения физических свойств печного шлака, в частности, снижения жидкотекучести и улучшения способности к вспениванию, а также к активизации рафинировочных процессов в дуговой сталеплавильной печи при работе на шихтовых материалах с высоким содержанием окислов железа разработана технология ведения плавки, которая включает следующие операции:

– присадка по ходу плавки кусковых шлакообразующих материалов;

– раскисление шлака по ходу плавки присадкой кусковых углеродсодержащих материалов фракцией 10…50 мм;

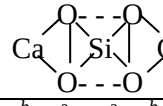
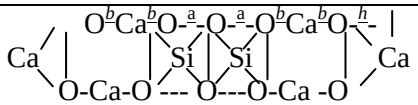
– присадка углеродсодержащих материалов осуществляется через 2…3 мин после подачи шлакообразующих в область их присадки;

– количество присаживаемых углеродсодержащих материалов определяется с учетом массы печного шлака и содержания в нем окислов железа из расчета обеспечения в шлаке их содержания на уровне 3…5 %.

Табл. 1. Параметры шлакового режима печи ДСП-2 системы Danark емкостью 120 т при работе на металлошихте с высоким содержанием окислов железа

Содержание компонентов, % Диапазон содержания компонентов, %						Основность шлака, $\frac{CaO+MgO}{SiO_2}$, ед.
SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	MnO	FeO	
15,5 13,3-21,4	20,63 18,4-33,1	4,34 3,2-6,1	5,54 1,5-8,3	5,63 4,6-7,4	36,91 32,1-45,2	1,74 1,58-2,96

Табл. 2. Стехиометрические и структурные формулы, параметры СИМ-комплексов силикатов кальция [4,5]

№ п/п	Формульный состав		СИМ-комплексы
	Стехиометрический	Структурный	Геометрические параметры полигональных ячеек: a=0,20 нм, b=0,153 нм, h=0,12 нм
1	$2CaOSiO_2$	$Ca_2Si_1O_4$ N=7, L=0,44 S_o=0,0126	
2	$6CaO2SiO_2$	$Ca_6Si_2O_{10}$ N=18, L=1,252 S_o=0,0131	

где N – количество частиц; L – длина (нм); S_o – относительная плотность упаковки.

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

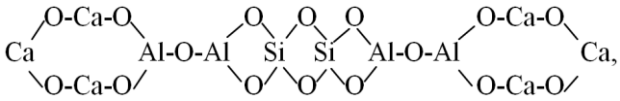
При содержании в печном шлаке данного химического состава 3…5 % окислов железа его основу составляют силикаты кальция. В зависимости от содержания окислов кальция и кремния возможно образование силикатов кальция двух типов. Стехиометрические и структурные формулы данных типов силикатов кальция, а также параметры их СИМ-комплексов представлены в табл. 2.

Однако наряду с тем, что печной шлак содержит окислы алюминия, при данном их содержании, в шлаке будут формироваться сегрегации из алюмосиликатов кальция [4,6].

Структурная формула алюмосиликатов кальция имеет вид:

$$2(SiO_2Al_2O_33CaO)_{НМВ} \rightarrow Si_2Al_4Ca_6O_{16}$$

и соответствует СИМ-комплексу:



который в активированном состоянии после раскисления углеродом по реакции:

$$2(SiO_2Al_2O_33CaO) + 4(C) \rightarrow 4CO + 2Ca + +(2Ca^{2+}2CaOSiO_22Al_2O_3)\uparrow$$

способен адсорбировать серу из металла в печной шлак по реакции:

$$(2Ca + 2Ca^{2+}2CaOSiO_22Al_2O_3) + 4[S]_{Me} \rightarrow \rightarrow (2SiO_22Al_2O_32CaO4CaS).$$

Расход присадочных материалов регламентируется степенью рафинирования при заданном марочном составе стали. Печной шлак основностью $B_0 \leq 2,0$, отвечающий составу основных компонентов ортосиликата кальция ($2CaOSiO_2$), ассимилирует находящиеся в металле окислы в виде неметаллических включений с образованием в печном шлаке химических сегрегаций по реакции:

$$2(8SiO_22Al_2O_38CaO4CaS)+ 20(2CaOSiO_2) \rightarrow \rightarrow (36SiO_24Al_2O_356CaO8CaS).$$

Печной шлак в количестве 6,3 кг/т содержит (масс. %): $34,4SiO_2+6,5Al_2O_3+49,9CaO+9,2CaS$ при $B_0=1,45$, B=1,72, M =1,45, адсорбционная емкость по сере $A_S=4,1$ %, адсорбционная емкость по кислороду, $A_O=14,3$ %, степень эвтектичности, $\eta_Э=96,4$ % (41,4 % $12SiO_24Al_2O_316CaO8CaS$ ($Э_1$)+ + 55,0 % $24SiO_236CaO$ ($Э_2$)), температура ликвидуса, рассчитанная аддитивно по температурам плавления $Э_1$ и $Э_2$, составляет Тл ~1350 °С [4,7].

Известные модели управления процессами рафинирования стали [8,9], в которых адсорбционную емкость шлаков оценивают по термодинамическим характеристикам печного шлака с учетом химического состава, поверхностного натяжения, работы адгезии и когезии, не учитывают влияние структурно-химического состояния неметаллических фаз и являются очень сложными.

Структурно-химическое состояние печного шлака определяет природу физической или химической сорбции компонентов с образованием гетерогенного или гомогенного рафинировочного шлака, соответственно. Гетерогенные шлаки представляют собой взвесь твердых и жидких компонентов или эмульсию жидких компонентов, химически не связанных между собой отдельных сегрегаций, которые конвективными потоками увлекаются в объем жидкого металла. Гомогенные печные шлаки на поверхности металлического расплава являются жидкоподвижными ассоциированными растворами, химически и структурно связанными между собой компонентами полимерных фаз, устойчивых к разрушению при конвективном перемешивании. Гомогенные печные шлаки отличаются повышенной сорбционной емкостью, которая становится максимальной при подобии химического состава и структуры ионно-молекулярных комплексов шлака и неметаллических включений. Кроме того, сорбционная емкость рафинировочного шлака к примесным элементам в стали (кислород, сера и др.) повышается для активированного состояния, когда освобождаются химические связи оксидных компонентов шлака за счет его раскисления и образования новых химических связей с кислородом и серой, растворенных в металле.

Выводы

На основании проведенных исследований разработана технология ведения плавки в дуговой сталеплавильной печи для переработки металлической шихты с повышенным содержанием окислов железа. Предложен механизм формирования печного шлака с высокой рафинировочной способностью, а также механизм его рафинировочных действий на основе структурно-химического состояния основных компонентов шлака и их сегрегаций. Предложенный механизм позволяет управлять процессом формирования активированного печного шлака и значительно повысить его рафинирующее действие. Кроме того, позволяет прогнозировать и оптимизировать технологические параметры рафинирования стали в зависимости от состава металла, шлака и типа присадочных материалов (шлакообразующие, твердые шлакообразующие смеси, флюсы).

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

Список литературы

1. Зайцев, А.И. Физическая химия металлургических шлаков / А.И.Зайцев, Б.М. Могутнов, Е.Х. Шахпазов. – М.: Наука, 2008. – 352 с.
2. Development of fluoride-free fluxes for billet casting / A.B. Fox et al. // SIJ Int. – 2005. – No.7. – P. 1051-1058.
3. A model for the silicon-manganese deoxidation of steel weld metals / O.Grong [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions. – 1986. – Vol.17. – P. 1797-1807.
4. Полигональная диаграмма состояния тройной системы FeO-SiO_2-CaO // Б.Ф.Белов [и др.] // Процессы литья. – 2006. – №4. – С. 18-22.
5. Классификация и структуризация силикатов кальция /А.Я. Бабанин [и др.] // Вестник ДонНТУ. – 2020. – №1(19). – С. 53-58.
6. Бабанин, А.Я. Наноструктурный анализ механизма образования неметаллических включений при ковшевой обработке стали сплавами ферросиликоалюминий и силикокальций /А.Я. Бабанин, Б.Ф. Белов, В.В. Белоусов // Электрометаллургия. – 2018. – №8. – С. 30-38.
7. Обработка железоуглеродистых расплавов высокоактивными реагентами: Монография / А.Я. Бабанин [и др.]. – Донецк: Восточный издательский дом, 2015. – 219 с.
8. Шахпазов, Е.Х. Модели управления процессами ковшевой обработки стали / Е.Х. Шахпазов, А.И. Зайцев, Н.Г. Радионова // Металлург. – 2008. – №6. – С. 30-35.
9. Innovatory Technology of Direct Steel Alloying and Ways of its Development / G. Jandieri [et al.] // Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences. – 2011. – No.1. Vol.5. – P. 84-88.

A.Ya. Babanin /Dr. Sci. (Eng.)/
Donbas National Academy of Construction and Architecture (Makeyevka)
B.F. Belov /Cand. Sci. (Eng.)/, A.Ya. Mints, I.A. Abakumov
Yuzovsky Metallurgical Plant (Donetsk)

THE TECHNOLOGY OF SMELTING SEMI-PRODUCT OF METAL CHARGE WITH HIGH CONTENT OF IRON OXIDES IN AN ARC STEEL-MELTING FURNACE

Background. *The main features of the work of regional mini-metallurgical enterprises, built to process the accumulated metal scrap and provide the region with the necessary metal products, are the operation of an electric arc furnace on a metal charge with increased content of iron oxides and smelting with a shortage of the necessary slag-forming materials, desulfurizers and fluxes. This leads to an increase in the melting duration and a significant increase in the cost of metal products.*

Materials and/or methods. *The studies were carried out under industrial conditions at the State Enterprise «Yuzovsky Metallurgical Plant». Smelting of steel grades St3sp and St4sp was carried out following the current technological instructions for the smelting of semi-finished products in an arc steelmaking furnace DSP-2 with a capacity of 120 tons of the Danark system and with further out-of-furnace finishing of the metal on the ladle-furnace unit. The determination of the mechanism of the refining action of the furnace slag was carried out based on the analysis of the structural-chemical state of the main components of the slag and their segregations.*

Results. *The results obtained indicate that the content of iron oxides in the furnace slag significantly exceeds the technological standards for conducting melting in an arc steel-making furnace. The average value of iron oxides' content is at the level of 37.0 %, and the floating content of iron oxides in the slag varies in the range from 32.1 to 45.2 %. The furnace slag is very fluid, does not foam and the steel arc furnace operates in open arc mode. Such high-iron slags are characterized by low refining ability, in particular, to remove sulfur from metal. The content of the main components CaO-SiO2-Al2O3 in terms of the three-component system is, respectively, %: 50.98-38.01-10.72. The developed technology of smelting includes the following operations: additives during smelting of lumpy slag-forming materials; slag deoxidation during the melting process by adding lump carbon-containing materials with a fraction of 10…50 mm; the addition of carbon-containing materials is carried out 2…3 minutes after the supply of slag-forming materials to the area of their additive; the amount of carbon-containing materials to be added is determined taking into account the mass of the furnace slag and the content of iron oxides in it based on the provision of their content in the slag at the level of 3…5 %.*

Conclusion. *Technology has been developed to conduct melting in an arc steel-making furnace for processing a metal charge with increased iron oxides. A mechanism for forming furnace slag with a high refining capacity and a mechanism for its refining action, based on the structural-chemical state*

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

of the main components of the slag and their segregations, is proposed. The proposed mechanism allows control of activated furnace slag formation and significantly increases its refining effect and predicts and optimises the technological parameters of steel refining depending on the composition of the metal, slag, and type of filler materials.

Keywords: *arc steel furnace, metal charge, iron oxides.*

Сведения об авторах

А.Я. Бабанин
Author ID: 25928278900
Телефон: +380 (71) 358-59-50
Эл. почта: bay1957@mail.ua

Б.Ф. Белов
Телефон: +380 (71) 478-47-65
Эл. почта: belosvet@mail.ru

А.Я. Минц
Телефон: +380 (71) 391-85-91
Эл. почта: minc@istil.com.ua

И.А. Абакумов
Телефон: +380 (71) 426-50-47
Эл. почта: vanekweird@mail.ru

Статья поступила 26.11.2020 г.
© А.Я. Бабанин, Б.Ф. Белов, А.Я. Минц, И.А. Абакумов, 2020
Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров



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

УДК 621.771.27

С.А. Снитко /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
Н.П. Денищенко
ГОУ ВО ЛНР «Донбасский государственный технический институт» (Алчевск)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ КРУГЛОГО КАЛИБРА

Разработаны математические модели контура и поверхности круглого калибра. На этой основе получены аналитические формулы для расчета таких параметров, как длина очага деформации, степень и скорость деформации, фактор формы очага деформации с учетом влияния текущей координаты по ширине круглого калибра. Формулы получены для оценки неравномерности деформации металла по ширине круглого калибра при прокатке овальных раскатов различных типов.

Ключевые слова: *математическая модель поверхности круглого калибра, аналитическая формула, длина очага деформации, степень и скорость деформации, фактор формы очага деформации.*

Постановка проблемы

Система калибров овал-круг имеет широкое распространение. На практике применяют однорадиусные, двух- и трехрадиусные, а также плоские овалы. При этом актуальными вопросами являются повышение стойкости калибров и устойчивости раската в проводках и в круглом калибре, а также снижение неравномерности деформации металла по ширине круглого калибра.

Использование современных подходов, реализуемых на базе аналитических и численных методов, требует создания модели поверхности круглого калибра, на базе которой возможно решение многих задач, связанных с проектированием рациональных калибровок для прокатки широкого сортамента круглых профилей.

Анализ последних исследований и публикаций

В трудах известных ученых Бахтинова В.Б., Литовченко Н.В. и др. отмечается, что система овал-круг применяется как одна из систем вытяжных калибров, а также как система предчистового и чистового калибров при прокатке круглых профилей.

В первом случае форма черновых калибров при использовании этой системы обеспечивает плавный переход от одного профиля к другому, что актуально при прокатке качественной и легированной стали. В этом случае также можно получать готовый круглый профиль из черновых промежуточных калибров.

Во втором случае предчистовой и чистовой калибры при использовании этой системы позволяют обеспечить точность готового круглого профиля.

Теоретическим и технологическим вопросам совершенствования системы калибров овал-круг посвящены публикации [1…4 и др.], что свидетельствует об актуальности темы.

В известных методиках [5…8] определение ряда параметров, таких как размеры (высота и ширина) предчистового раската, абсолютное обжатие, уширение и др., выполняется по упрощенным эмпирическим формулам. А определение таких важных параметров, как степень и скорость деформации, фактор формы очага деформации, длина дуги контакта, площадь контактной поверхности и др., выполняется по эмпирическим формулам, которые не учитывают влияние текущей координаты по ширине круглого калибра.

Цель (задачи) исследования

Целью работы является создание математических моделей контура и поверхности круглого калибра и разработка на этой основе аналитических формул для расчета таких параметров, как длина очага деформации, степень и скорость деформации, фактор формы очага деформации с учетом влияния текущей координаты по ширине круглого калибра.

Основной материал исследования

Разработаем математическую модель контура круглого калибра (рис. 1), который образован дугой окружности с радиусом R и отрезком сопряженной с ней прямой в зоне выпуска.

На рис. 1 используются следующие обозначения: D – диаметр валка по разъему круглого калибра; h – глубина ручья круглого калибра; R – радиус круглого калибра; B_0 – ширина

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

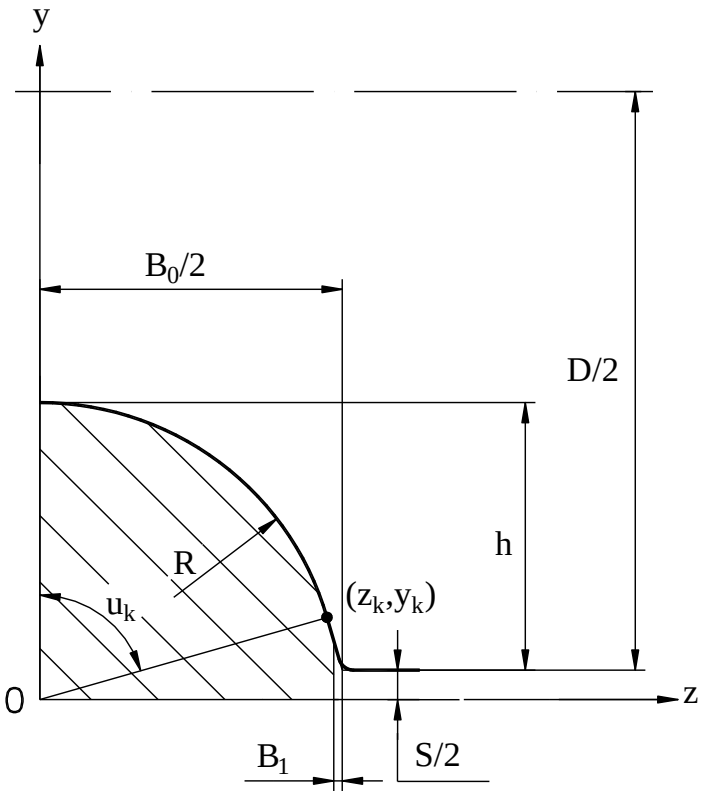


Рис. 1. Круглый калибр в плоскости *y*0*z*

круглого калибра; B_1 – незаполнение круглого калибра; S – межвалковый зазор; z_k, y_k – координаты точки сопряжения касательной, проведенной из точки скелета круглого калибра (определяющей его ширину) к дуге окружности с радиусом R; u_k – угол между прямой, соединяющей точку сопряжения (z_k, y_k) с центром координат, и осью 0*y*.

Так как круглый калибр является симметричным относительно его горизонтальной и вертикальной осей, то рассмотрим его четвертую часть. В контур калибра входит дуга окружности с радиусом R и выпуск, выполненный по касательной к ней. То есть из точки с координатами $\left(\frac{B_0}{2},\frac{S}{2}\right)$ (см. рис. 1) проводится касательная к окружности с радиусом R, у которой центр имеет координаты $\left(0,\frac{S}{2}+h-R\right)$. Получим формулы для расчета z_k, y_k, u_k. Координаты точки сопряжения прямой, проходящей через точку $\left(\frac{B_0}{2},\frac{S}{2}\right)$, с окружностью, у которой координаты центра (0, y_n), где $y_n=\frac{S}{2}+h-R$, определяются в результате совместного решения уравнений окружности (описывающей дугу калибра с радиусом R) и прямой с угловым коэффициентом k (описывающей выпуск калибра):

$$z^2-(y-y_n)^2=R^2, \qquad (1)$$

$$y=k\left(z-\frac{B_0}{2}\right)+\frac{S}{2}. \qquad (2)$$

Угловой коэффициент k определяем из условия, что дискриминант квадратного уравнения, полученного в результате подстановки уравнения прямой в уравнение окружности, равняется нулю. В этом случае получим касание прямой и окружности. Выражение для углового коэффициента касательной будет иметь вид:

$$k=\frac{-\left(\frac{S}{2}-y_n\right)\cdot\frac{B_0}{2}+R\cdot\sqrt{\left(\frac{B_0}{2}\right)^2+\left(\frac{S}{2}-y_n\right)^2-R^2}}{R^2-\left(\frac{B_0}{2}\right)^2}. \qquad (3)$$

Соответственно, для координат точки касания (z_k, y_k,) получаем следующие выражения:

$$z_k=\frac{\frac{B_0}{2}\cdot k^2-k\cdot\left(\frac{S}{2}-y_n\right)}{1+k^2},$$

$$y_k=k\left(z_k-\frac{B_0}{2}\right)+\frac{S}{2}. \qquad (4)$$

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

Угол u_k между прямой, соединяющей центр окружности с точкой касания, и вертикальной осью равен:

$$u_k = \frac{180}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{z_k}{R}\right). \quad (5)$$

На рис. 1 заштрихованная часть сечения является раскатом. Его ширина определяется прямой $z = \frac{B_0}{2} - B_1$.

Разработаем математическую модель поверхности круглого калибра. Найдем поверхность вращения дуги 1, показанной на рис. 2, относительно оси валка, имеющего диаметр D. Указанная дуга окружности с радиусом R имеет центр в точке с координатами ($z_ц$, $y_ц$), где $z_ц$=0, а $y_ц = \frac{S}{2} + D - h + R$.

Из уравнения окружности

$$(z - z_ц)^2 + (y - y_ц)^2 = R^2$$

находим уравнение дуги 1 (рис. 2):

$$y = y_ц - \sqrt{R^2 - (z - z_ц)^2}. \quad (6)$$

Чтобы получить уравнение поверхности, образованной вращением дуги 1 вокруг оси валка, нужно в уравнение (6) вместо y подставить выражение для радиуса вращения $R_{вр}$ произвольной точки дуги 1, которое имеет вид:

$$R_{вр} = \sqrt{X^2 + \left(Y - \left(\frac{S}{2} + \frac{D}{2}\right)\right)^2}. \quad (7)$$

В результате вышеуказанной подстановки получим:

$$\sqrt{X^2 + \left(Y - \left(\frac{S}{2} + \frac{D}{2}\right)\right)^2} = y_ц - \sqrt{R^2 - (Z - z_ц)^2}, \quad (8)$$

где X, Y, Z – координаты точки на поверхности вращения дуги 1 (рис. 2).

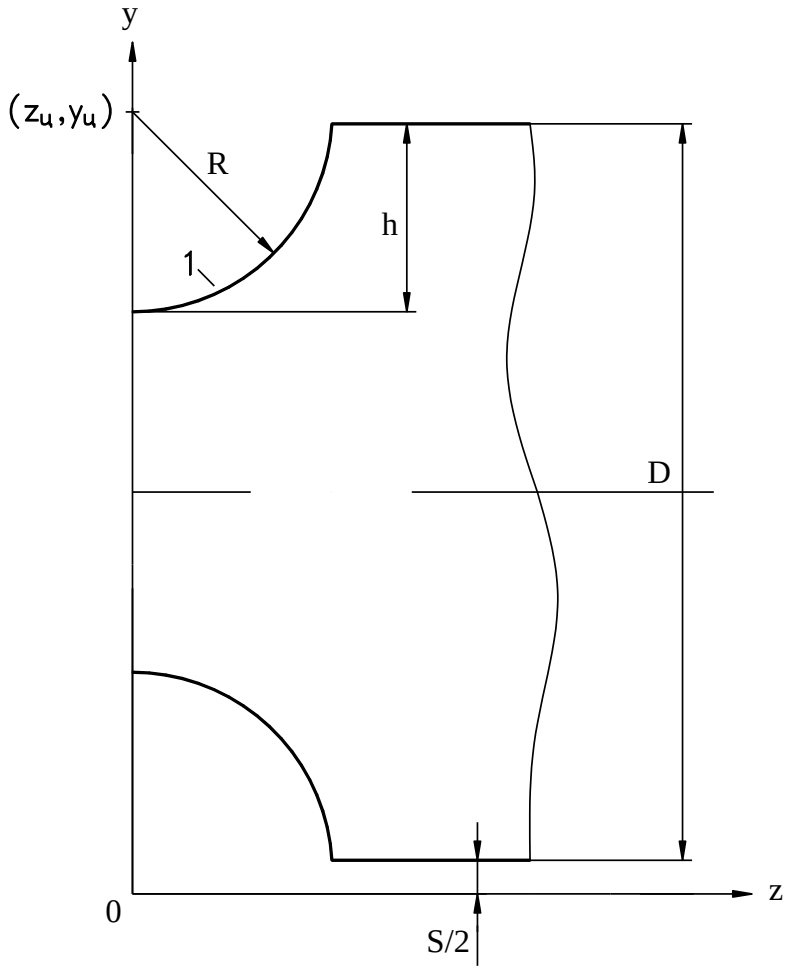


Рис. 2. Контур сечения валка в плоскости $y0z$:
1 – дуга окружности радиуса R с центром в точке ($z_ц$, $y_ц$), которая описывает контур ручья круглого калибра без учета выпуска

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

Возведя обе части уравнения (8) в квадрат, получаем математическую модель поверхности круглого калибра (9):

$$X^2+\left(Y-\left(\frac{S}{2}+\frac{D}{2}\right)\right)^2-y_ц^2+$$
$$+2y_ц\sqrt{R^2-\left(Z-z_ц\right)^2}-R^2+$$
$$+\left(Z-z_ц\right)^2=0. \qquad (9)$$

На рис. 3 показано сечение поверхности круглого калибра в плоскости $y0x$ в момент контакта с подкатом (при $z=z_T$) (рис. 4).

Разработка математической модели поверхности круглого калибра (9) в зоне дуги окружности с радиусом R дает возможность получить аналитические формулы для расчета таких параметров, как длина очага деформации, степень и скорость деформации, фактор формы очага деформации с учетом влияния координаты z по ширине круглого калибра.

После выбора типа овального калибра (одно-радиусного, двух- или трехрадиусного или плоского), который предшествует круглому калибру, выполняется его проектирование. В этом случае обжатие $\Delta h(z_T)$ (рис. 4) в зависимости от текущей координаты z_T по ширине калибра является известным. На рис. 4 совместно с контуром круглого калибра показана часть контура подката, проходящая через точку A, соответствующую текущей координате z_T, в которой обжатие металла равно $\Delta h(z_T)$.

При $z=z_T$ половина высоты прокатанного круглого профиля (y_T) равна:

$$y_T=\left(\frac{S}{2}+h-R\right)+\sqrt{R^2-z_T^2}. \qquad (10)$$

При известных значениях координат z_T и y_T, которые соответствуют точке A (точке первоначального контакта металла с поверхностью калибра, рис. 3, 4), длина очага деформации определяется из уравнения (9) и имеет вид:

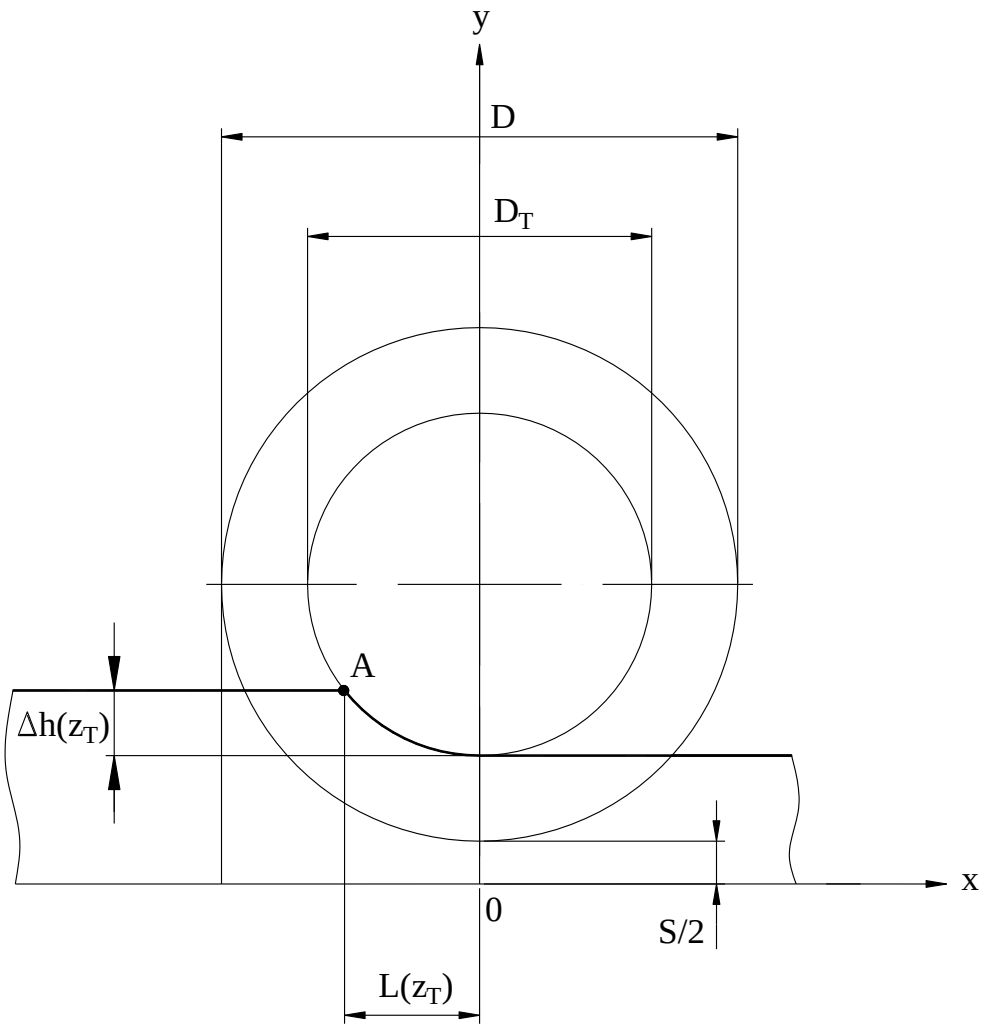


Рис. 3. Сечение валка и полосы в зоне круглого калибра в плоскости $y0x$, сечение выполнено при $z=z_T$, $D_T=D+S-2y_T$

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

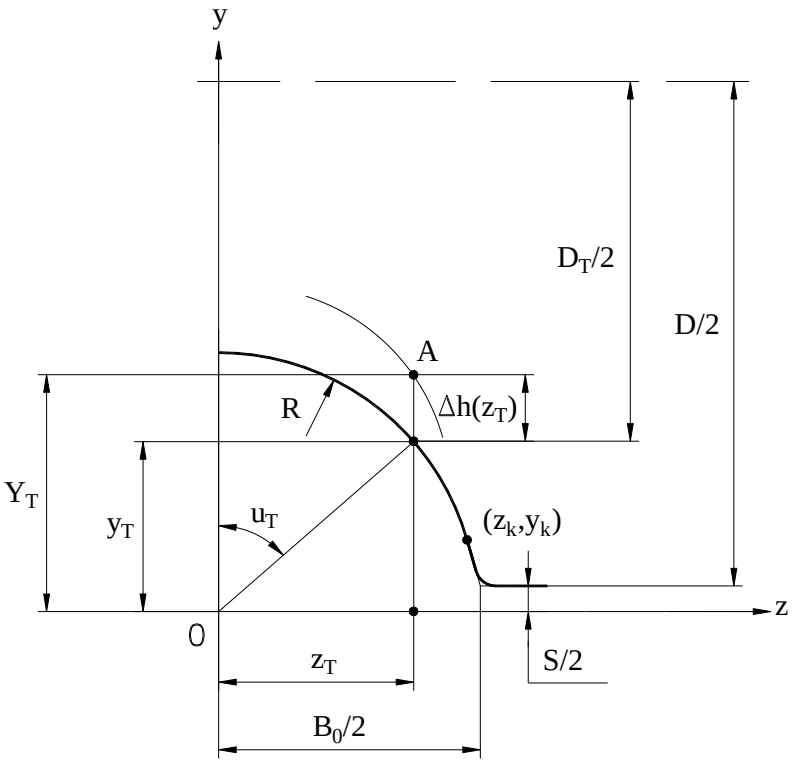


Рис. 4. Схема совмещенного построения части подката в зоне точки *A* первоначального контакта металла при $z=z_T$ и круглого калибра

$$L(z_T)=\left(\left(y_T-\left(\frac{S}{2}+\frac{D}{2}\right)\right)^2-y_ц^2+\right.$$

$$\left.+2y_ц\sqrt{R^2-(z_T-z_ц)^2}-R^2+(z_T-z_ц)^2\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

При $z=z_T$ половина высоты задаваемого подката (Y_T) равна (см. рис. 4):

$$Y_T=\left(\frac{S}{2}+h-R\right)+\sqrt{R^2-z_T^2}+\Delta h(z_T). \quad (12)$$

Степень деформации в зависимости от текущей координаты z_T по ширине круглого калибра равна:

$$\varepsilon(z_T)=\frac{\Delta h(z_T)}{Y_T}. \quad (13)$$

Степень логарифмической деформации в зависимости от текущей координаты z_T по ширине круглого калибра равна:

$$\bar{\varepsilon}(z_T)=\ln\left(\frac{Y_T}{y_T}\right). \quad (14)$$

Скорость деформации в зависимости от текущей координаты z_T по ширине круглого калибра равна:

$$u(z_T)=\frac{\varepsilon(z_T)}{\tau}=\frac{\varepsilon(z_T)}{L(z_T)}\cdot V(z_T)=\frac{\pi\cdot D_T\cdot n\cdot\varepsilon(z_T)}{60\cdot L(z_T)}, \quad (15)$$

где $V(z_T)$ – окружная скорость вращения валка, соответствующая $D_T=D+S-2y_T$; n – угловая скорость вращения валка (об/мин).

Фактор формы очага деформации в зависимости от текущей координаты z_T по ширине круглого калибра равен:

$$\frac{L(z_T)}{Y_T+y_T}. \quad (16)$$

Выводы

Разработана математическая модель поверхности круглого калибра. На ее основе получены аналитические формулы для расчета таких параметров, как длина очага деформации, степень и скорость деформации, фактор формы очага деформации с учетом влияния текущей координаты по ширине круглого калибра. Анализ указанных параметров применительно к различным типам овальных калибров (раскатов) позволяет оценить неравномерность деформации металла по ширине круглого калибра и, в итоге, разработать рациональные калибровки для прокатки широкого сортамента круглых профилей.

Список литературы

1. Hong, H. Roll pass design and simulation on

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

continuous rolling of alloy steel round bar // Procedia Manufacturing: 9th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS'2019). – 2019. – Vol.37. – P. 127-131.
2. Dong, Y. Research on the characteristics of forward slip and backward slip in alloyed bar rolling by the round-oval-round pass sequence / Y. Dong, J. Song // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – No.9. Vol.87. – P. 3605-3617.
3. Mathematical model of neutral line on the contact zone in alloyed bar rolling by the round-oval-round pass sequence / Y. Dong et al. // International Journal of Mechanical Sciences. – 2016. – Vol.115-116. – P. 180-189.
4. Dong, Y. A New Analytical Model for the Calculation of Mean Roll Radius in Round-oval-round Alloy Bar Rolling / Y. Dong, W. Zhang, J. Song // ISIJ International. – 2006. – Iss.10. Vol.46. – P. 1458-1466.
5. Илюкович, Б.М. Прокатка и калибровка. Т.I (Справочник) / Б.М. Илюкович, Н.Е. Нехаев, С.Е. Меркурьев. – Днепропетровск: РВА «Дніпро–ВАЛ», 2002. – 506 с.
6. Бахтинов, В.Б. Технология прокатного производства. – М: Металлургия, 1983. – 486 с.
7. Николаев, В.А. Деформация металла при прокатке в калибрах: Монография. – Запорожье: Издательство Запорожской государственной инженерной академии, 2006. – 196 с.
8. Шум, В.Б. Чистовой универсальный калибр для прокатки круглых профилей / В.Б. Шум, Е.Н. Смирнов, А.В. Яковченко // Научные труды ДонНТУ. Металлургия. – 2008. – Вып.10(141). – С. 178-184.

S.A. Snitko /Dr. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
N.P. Denishchenko
Donbas State Technical Institute (Alchevsk)

A MATHEMATICAL MODEL OF THE ROUND GAUGE SURFACE

Background. *The oval-round gauge system is widely used. In practice, one-radius, two- and three-radius, as well as flat ovals used. At the same time, the most important issues are to increase the stability of gauges and roll stability in the roller fittings and in the round gauge, as well as to reduce the uneven deformation of the metal along the width of the round gauge.*
Materials and/or methods. *The use of modern approaches implemented on the basis of analytical and numerical methods requires the creation of a model of the surface of a round gauge, on the basis of which it is possible to solve many problems related to the design of rational calibrations for rolling a wide range of round profiles.*
Results. *Mathematical models of the contour and surface of a round gauge are developed. On this basis, analytical formulas are obtained for calculating parameters such as the length of the deformation centre, the degree and speed of deformation, and the shape factor of the deformation centre, taking into account the influence of the current coordinate along the width of the round gauge.*
Conclusion. *Analysis of such parameters as the length of the deformation centre, degree and rate of the deformation, shape factor of the deformation centre taking into account the influence of the current position across the width of the round gauge for the various types of oval gauges (rolls) allows to evaluate the uniformity of metal deformation across the width of the round gauge, and ultimately, to develop a rational calibration for rolling of a wide assortment of round profiles.*

Keywords: *mathematical model of a round gauge surface, analytical formula, length of the deformation centre, degree and rate of deformation, shape factor of the deformation centre.*

Сведения об авторах

С.А. Снитко
SPIN-код: 8463-3786
Author ID: 844696
ORCID iD: 0000-0002-1099-5801
Телефон: +380 (71) 420-66-39
Эл. почта: snitko_sa@mail.ru

Н.П. Денищенко
SPIN-код: 2571-3526
Author ID: 1091297
ORCID iD: 0000-0002-7274-3466
Телефон: +380 (72) 131-77-32
Эл. почта: nd76696@gmail.com

Статья поступила 26.11.2020 г.
© С.А. Снитко, Н.П. Денищенко, 2020
Рецензент д.т.н., проф. А.В. Яковченко

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;

– 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 адрес персональной эл. почты.

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**

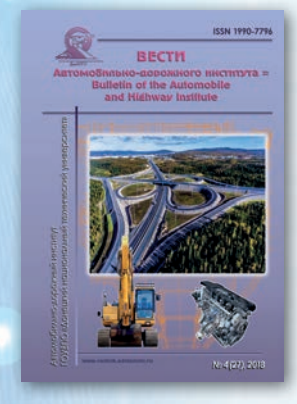
Внимание! Убедительная просьба, проверить получение редакцией материалов любым из способов (по телефонам **+380 (66) 176-72-65, +380 (62) 301-07-89** или эл. почте).

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, публикация которых оплачивается, согласовываются непосредственно с редакцией журнала.

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

НАУЧНЫЕ ИЗДАНИЯ Донецкого национального технического университета



Журнал «Вести Автомобильно-дорожного института = Bulletin of the Automobile and Highway Institute»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА № 000051 от 20 октября 2016 г.
Приказ МОН ДНР № 960 от 09.07.2019 г. о включении в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР
Лицензионный договор с РИНЦ № 427-07/2013 от 23.07.2013 г.

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
05.04 Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение;
05.22 Транспорт;
05.23 Строительство и архитектура;
08.00 Экономические науки.

Подробная информация - http://vestnik.adidonntu.ru



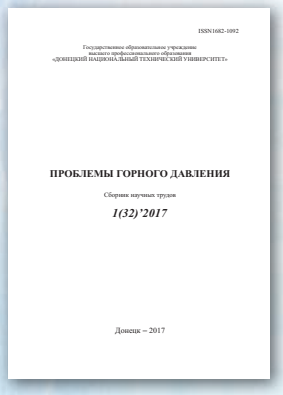
Научный журнал «Информатика и кибернетика»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000145 от 20.06.2017 г.
Приказ МОН ДНР № 34/16 от 28.01.2019 г. о включении в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР
Лицензионный договор с РИНЦ № 425-07/2016 от 14.07.2016 г.

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
05.13 Информатика, вычислительная техника и управление;
05.01 Инженерная геометрия и компьютерная графика.

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



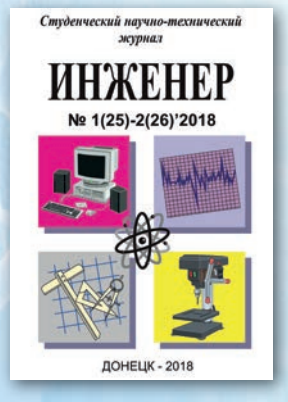
Международный научный журнал «Проблемы горного давления»

Свидетельство о регистрации в СМИ ААА №000142 от 20.06.2017 г.
Лицензионный договор с РИНЦ № 425-07/2016 от 14.07.2016 г.

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
25.00 Науки о земле;
05.26 Безопасность деятельности человека.

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



Студенческий научно-технический журнал «Инженер»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000134 от 06.06.2017 г.

Периодичность – 2 раза в год

Научно-исследовательская часть

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

science.donntu.org

ДонНТУ сегодня – это один из ведущих центров научной мысли Донбасса:

- *более 700 научно-педагогических работников;*
- *9 научных лабораторий, в т.ч. отдел интеллектуальной собственности и патентно-лицензионной работы;*
- *более 50 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 порядка 120 научных и научно-технических мероприятий, в т.ч. более 20 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