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

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЕСТНИК

№4 (26) 2021 г.

100 лет ДонНТУ



"Все препятствия и трудности-
это ступени, по которым
мы растем ввысь"

Памяти ректора

Минаев
Александр Анатольевич

Ректор ДонНТУ

(с 1990 г. по октябрь 2014 г.)

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



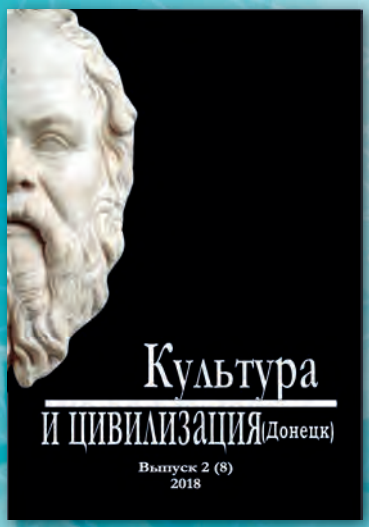
Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения»

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(26)'2021

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
Малеев В.Б. (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
2021. №4 (26)

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 №10 от 24.12.2021

Формат 60×84$^{1/8}$. Заказ 1221.
Изд-во «Донецкая политехника», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

А.А. Минаев
Особенности развития макси- и мини- заводов 3

А.Л. Кавера, Е.В. Курбацкий
Ю.Ф. Булгаков – путь в науке к созданию научной школы 10

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв
Методика диагностики состояния внутренней поверхности дымовой трубы 17

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

В.П. Кондрахин, В.Э. Кошелев
Математическое моделирование вертикальных и поперечных колебаний груза на кране с подвижной грузовой тележкой 23

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

И.А. Бершадский, А.В. Згарбул, И.И. Мазуров
Расчет зон защиты объектов электроенергетики многократными стержневыми молниеприёмниками 29

И.Б. Гуляева, М.К. Маренич, О.А. Демченко, Л.А. Муфель
Адаптация схемы магнитного пускателя к реализации комплексной защиты силового присоединения 38

А.Н. Мартыненко
Систематизация химического пространства двухэлементных соединений 48

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Д.А. Капустин, А.В. Кущенко
Результаты планированного эксперимента по определению реологических характеристик высококонцентрированной водоугольной суспензии 55

ИНФОРМАЦИЯ

Требования к статьям, направляемым в редакцию 63

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(26)'2021

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
Maleev V.B. (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
2021. No.4(26)

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.10 dated 24.12.2021

Format 60×84 1/8. Order 1221
Publishing house
"Donetsk Polytechnic", 2021

CONTENTS

SCIENTIFIC NOTES

A.A. Minaev
Features of the development of maxi and mini plants 3

A.L. Covera, E.V. Kurbatsky
Yu.F. Bulgakov - the path in science to the creation of a scientific school 10

ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

A.B. Biryukov, P.A. Gnitiev
Method for diagnosing the state of the internal surface chimney 17

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION ENGINEERING

V.P. Kondrakhin, V.E. Koshelev
Mathematical modeling of vertical and transversal load vibrations on a crane with a movable cargo trolley 23

ELECTRICAL ENGINEERING

I.A. Bershadskiy, A.V. Zgarbul, I.I. Mazurov
Calculation of protection zones of electric power objects by multiple lightning rods 29

I.B. Guliaeva, M.K. Marenich
O.A. Demchenko, L.A. Mufel
Adaptation of the magnetic starter circuit to the implementation of integrated protection of the power connection…… 38

A.N. Martynenko
Systematization of the chemical space of two-element compounds 48

CHEMICAL TECHNOLOGY

D.A. Kapustin,A.V. Kushchenko
Results of a planned experiment to determine the rheological characteristics of a highly concentrated water-coal suspension 55

INFORMATION

Requirements for the papers submitted to the Editorial office 63

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 669.02/09

А.А. Минаев /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

Из творческого наследия Александра Анатольевича Минаева (1942 – 2021 гг.),
выдающегося учѐного-металлурга, доктора технических наук, профессора,
члена-корреспондента Национальной академии наук Украины, заслуженного работника образования Украины, заслуженного деятеля науки и техники Украины,
дважды лауреата Государственной премии Украины,
ректора Донецкого национального технического университета с 1989 г. по 2014 г.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ МАКСИ- И МИНИ- ЗАВОДОВ

(из монографии: Минаев А.А. Совмещѐнные металлургические процессы / Донецк: Технопарк ДонГТУ УНИТЕХ, 2008. – 552 с.

Сопоставление характеристик металлургических предприятий, организованных по принципу макси- и мини-заводов, на современном этапе развития металлургии не позволяет однозначно отдать приоритет одному из них.

Интегрированный металлургический завод отличается от мини-завода, главным образом, видом железонесущей составляющей шихты для сталеплавильного агрегата.

В главе 4 [1] показаны преимущества мини-заводов перед интегрированными заводами, особенно при использовании валкового способа получения подката для горячей или холодной прокатки. К этому добавим данные по расходу энергии при различных схемах производства стали и проката, представленные на рис. 1. Из рисунка видно, что менее энергоѐмко производство проката при использовании в дуговой печи металлолома.

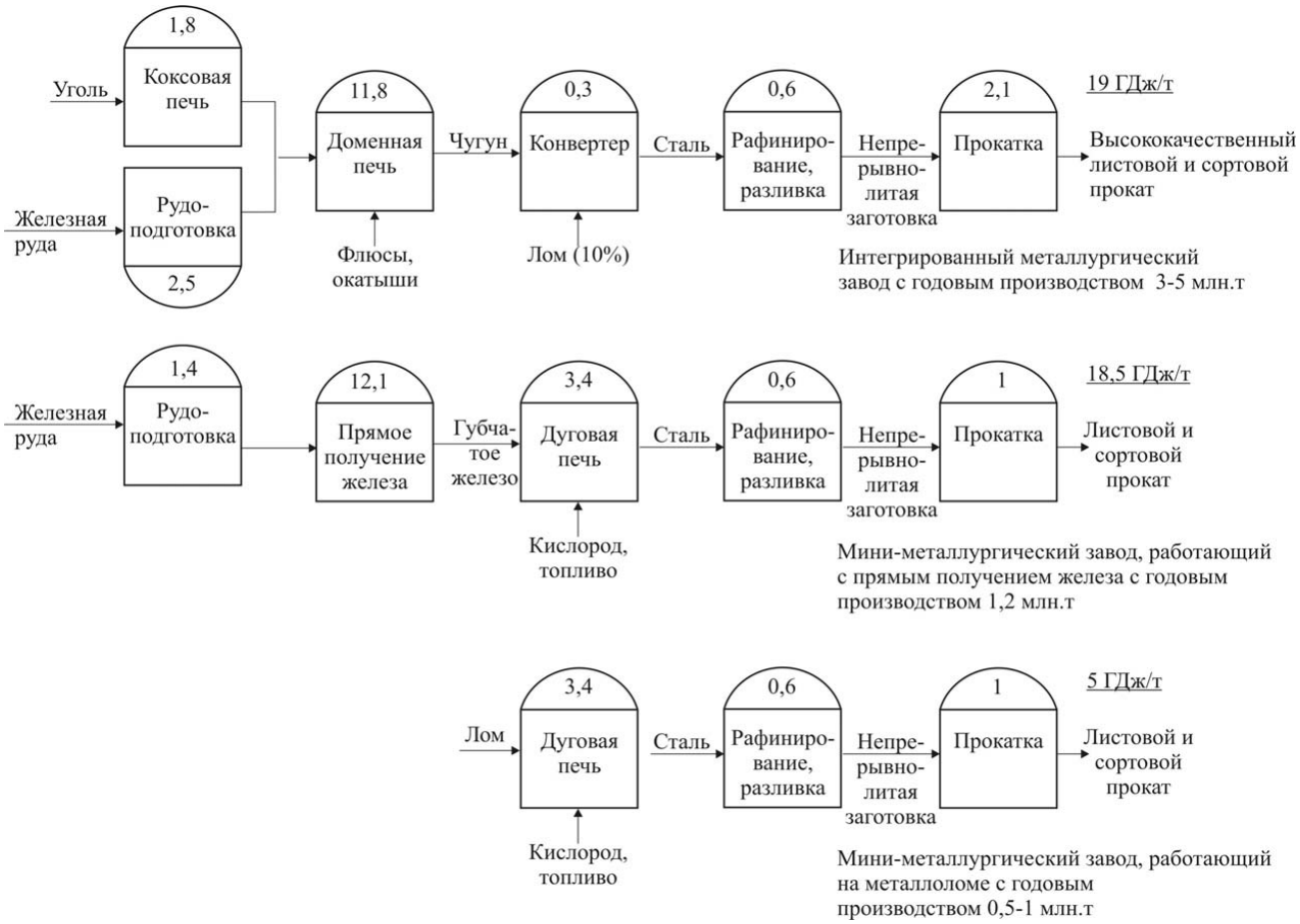


Рис. 1. Удельный расход энергии по стадиям процесса получения чугуна, стали и проката при использовании различных схем их производства [2]

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

Интересные результаты показало сравнение затрат энергии на производство проката на интегрированном заводе и мини-заводе, работающем на губчатом железе (схема, описанная в главе 4 [1] для завода «Салдана Стил»). Они практически одинаковы.

В работе [3] рассмотрены 9 вариантов структуры металлургических предприятий, от классического интегрированного металлургического завода с отливкой толстых и тонких слябов, до мини-завода с дуговыми печами, работающими на металлоломе и жидком чугуне и с отливкой тонких слябов. При этом годовую производительность предприятий варьировали от 0,8 до 3,8 млн. т. Для вариантов использования лома в дуговых печах и конвертерах стоимость металлолома принята 130 долларов США/т.

Конкурентоспособность предприятий существенно зависит от применяемой схемы. При схеме «дуговая печь, работающая на металлоломе – МНЛЗ для отливки тонких слябов» уровень удельных капитальных затрат по сравнению с другими схемами минимален. В целом конкурентоспособность предприятий будет в значительной мере определяться местными условиями, а также стоимостью и качеством металлолома.

Основными источниками металлолома являются отходы, образующиеся на металлургическом предприятии, отходы металлообработки в различных отраслях, амортизационный и бытовой лом. На рис. 2 показана динамика потребности в металлоломе и его составляющих по годам.

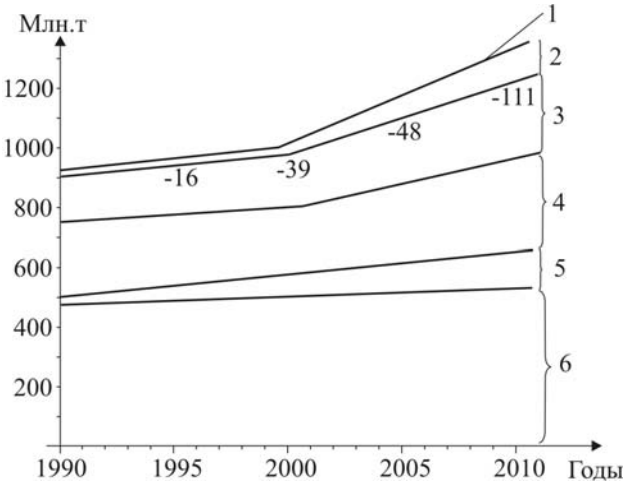


Рис. 2. Динамика потребности в металлоломе и его составляющих по годам [3]:
1 – общая потребность в металлошихте;
2 – дефицит металлошихты;
3 – амортизационный лом; *4* – заводской лом;
5 – прямое получение железа; *6* – жидкий чугун

Внутренние отходы металлургических предприятий (технологическая обрезь) резко сократились при переходе на непрерывную разливку стали и оснащение прокатных станов системами автоматического регулирования размеров проката (этот период на рис. 140 не отражен). Показанное на рис. 140 постепенное увеличение металлолома связано с увеличением объѐмов выплавки стали.

Доля отходов металлообработки (нами она отнесена к амортизационному лому) также увеличивается с ростом объѐмов производства стали и проката. Объѐмы амортизационного лома определяются металлофондом страны, и он постоянно растѐт. Из рис. 2 видно, что несколько увеличивается доля прямого получения железа, и незначительно – объѐмы выплавки чугуна. К 2010 г., по данным работы [2], дефицит металлошихты составит 111 млн. т. Причѐм этот дефицит образуется не только за счѐт уменьшения объѐмов лома, но и за счѐт ухудшения его качества. С увеличением оборота амортизационного лома содержание загрязняющих его элементов в ломе, а следовательно, и в готовой стали (особенно при еѐ выплавке в дуговых печах) повышается и в ряде случаев уже достигает концентрации, исключающей использование его в сталеплавильном производстве. На рис. 3 показана динамика по годам увеличения содержания наиболее вредных примесей тенденция к их увеличению.

Как показано на рис. 2, заменителем чугуна и металлолома может стать губчатое железо или металлизированное сырьѐ. Преимуществом способа получения железа непосредственно из руды является высокая чистота металла, поскольку исключается загрязнение его серой из кокса, другими примесями, переходящими в жидкий чугун при его образовании в доменной печи. Из такого чистого железа могут быть получены стали с высокими механическими, антикоррозионными свойствами, электротехническими характеристиками и другими свойствами. Основным продуктом прямого восстановления железа является твердый железорудный материал, в котором большая часть железа находится в металлическом виде. При большой степени металлизации продукт прямого восстановления называется губчатым железом, при более низкой (до 90-94 % металлического железа) – металлизованным сырьѐм. Основным назначением металлизованного продукта является переплав в дуговых сталеплавильных печах. В качестве исходного железорудного сырья используют агломерат, окатыши, а в качестве восстановителя – твердое топливо или газ, содержащий H_2 и CO.

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

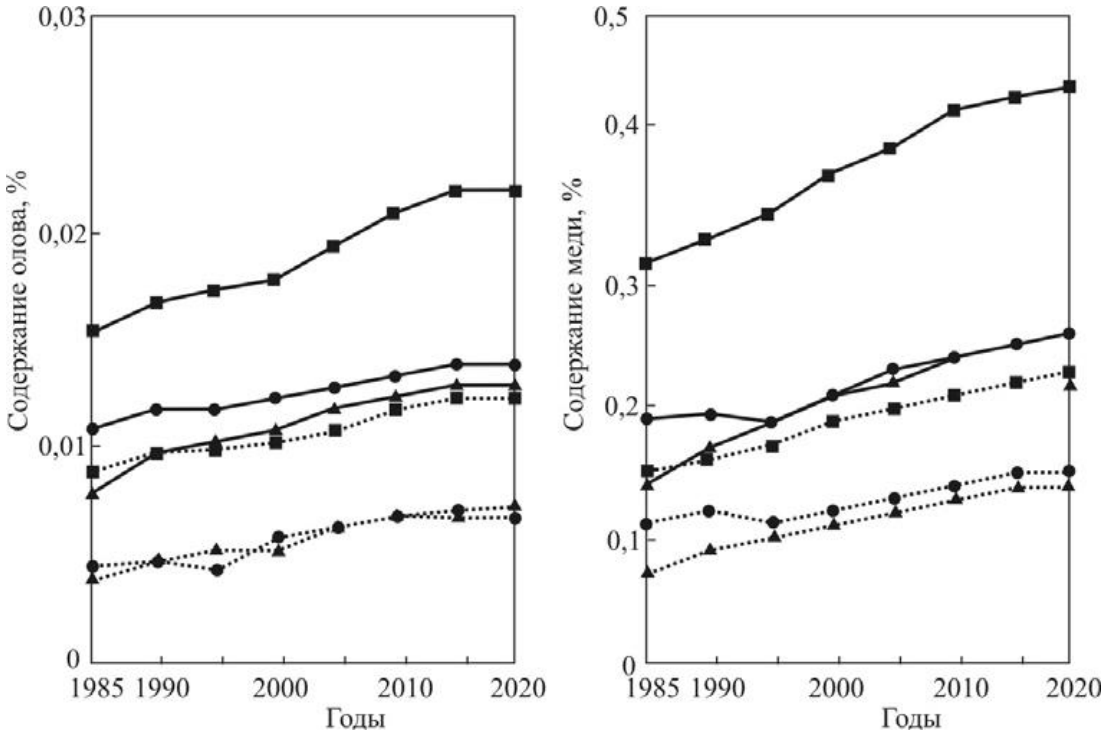


Рис. 3. Динамика (по годам) максимальных (сплошные линии) и минимальных (пунктирные линии) содержаний олова и меди в ломе [2]:
На Украине основным резервом увеличения качественного лома на ближайший период времени является устаревшее оборудование как на самих металлургических предприятиях, так и в машиностроении и транспорте

Из разработанных способов наибольшее распространение получил процесс «Мидрекс» (Midrex). На его долю в начале 2000-х годов приходится около половины всех мощностей по производству металлизованных окатышей или брикетов. Первая промышленная установка для реализации процесса «Мидрекс» пущена в эксплуатацию в 1969 г. на заводе в Портленде (США). Процесс «Мидрекс» осуществляют в невысоких шахтных печах или ретортах с использованием конвертированного природного газа. Конверсия природного газа состоит в превращении углеводородов путем их разложения на водород и углерод с последующим дожиганием углерода до CO при помощи углекислого газа и водяных паров по следующим реакциям:

$$CH_4+CO_2=2CO+2H_2;\ CH_4+H_2O=CO+3H_2.$$

На рис. 4 показана схема процесса «Мидрекс».

Технологический процесс происходит следующим образом. В конвертер подают смесь природного и колошникового газов. Конвертер представляет собой футерованный изнутри рекуператор прямоугольной формы, в котором установлены трубы из жаропрочной стали, заполненные кусковыми глиноземистыми огнеупорами, пропитанными никелевым катализатором. Снаружи трубы разогревают сжиганием колошникового газа. В этих трубах при температуре ~1000°C природный газ при помощи CO_2 колошникового газа конвертируется в восстановительный газ, содержащий 30 % CO и ~70 % H_2. Восстановительный газ подают в шахтную печь снизу, а сверху производят загрузку железорудного материала в виде окатышей или брикетов.

Печь по высоте разделена на две зоны с двумя самостоятельными оборотными циклами. Верхняя зона предназначена для восстановления железа восстановительным газом, который вырабатывается в конвертере, а нижняя – для охлаждения металлизованного продукта оборотным и изолирующим газом. Изолирующим газом служит часть продуктов сгорания, получаемых из конвертера после охлаждения. Оборотный газ отсасывается из верхней части зоны охлаждения, поступает в скруббер, а затем вентилятором вновь подается в нижнюю часть зоны охлаждения.

Отобранный восстановительный газ отсасывается из верхней части зоны восстановления, подвергается очистке и охлаждению в скруббере и далее 1/3 этого газа поступает в конвертер для конверсии природного газа. Температура окатышей в зоне восстановления 760 °C, на выходе из печи 40 °C. Продолжительность пребывания окатышей в зоне восстановления 4…6 ч.

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

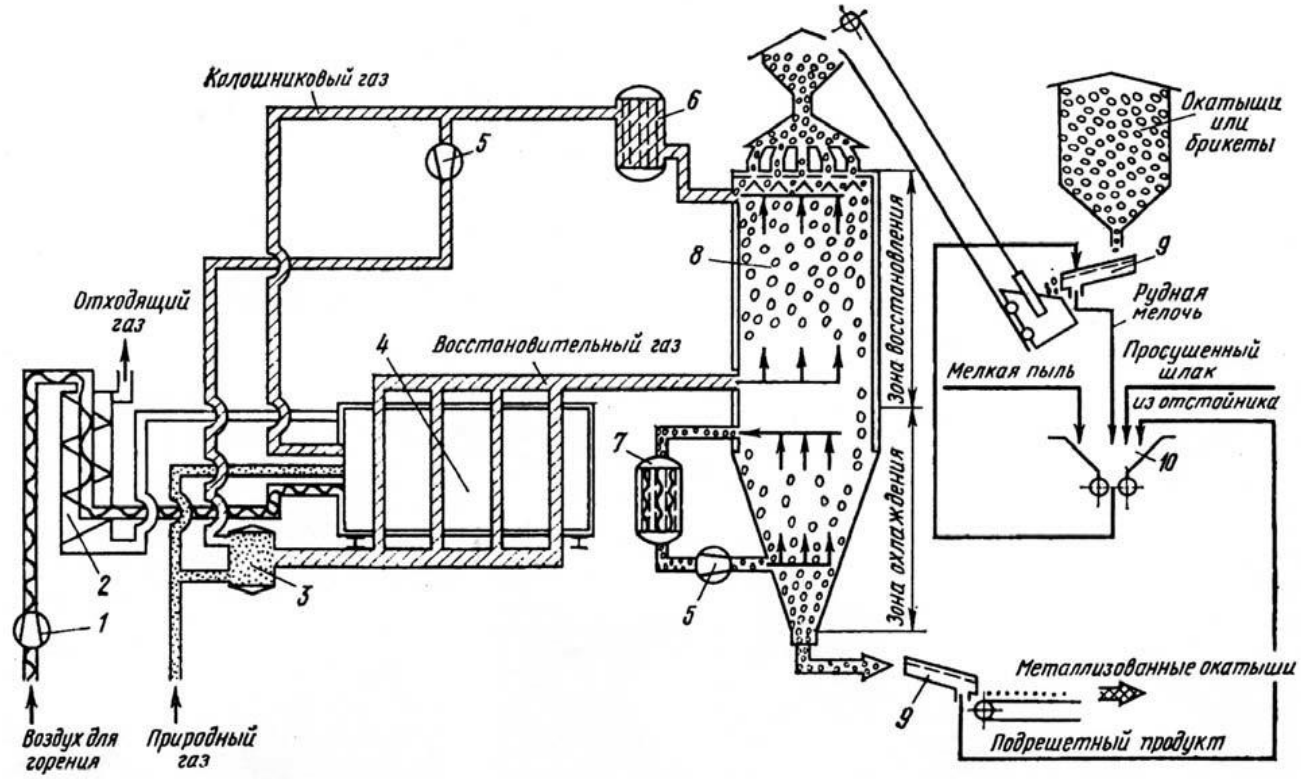


Рис. 4. Схема установки и технологического процесса «Мидрекс»:
1 – воздуходувка; *2* – теплообменник; *3* – смеситель газов; *4* – конвертер;
5– компрессор; *6, 7* – скрубберы для колошникового газа; *8* – шахтная печь;
9 – вибрационный грохот; *10* – брикетировочный пресс

Суммарная длительность пребывания окатышей в печи 8…12 ч. Содержание углерода в железной губке регулируют изменением расхода и соотношения восстановительного и изолирующего газов в охлаждающем газе. Полученные металлизованные окатыши выгружают из печи снизу. Их хранят в бункере, заполненном инертным газом. Окатыши содержат ~90 % металлического железа. Суточная производительность одной печи достигает 1000 т железа при расходе природного газа до 550 м^3/т. По такой схеме построен Оскольский электрометаллургический комбинат.

В настоящее время суточная производительность шахтных печей составляет 5…9 т/м^3, то есть в 2…4 раза выше, чем в доменной печи. Эти печи относительно небольшие (до 200 м^3, высотой 10…14 м и диаметром 3…3,5 м), суточная их производительность составляет 1000…1500 т.

Процесс «Corex» (жидкофазного восстановления железа из руды) – важный этап, изменивший отношение металлургов к бескоксовым способам получения жидкого чугуна. Он разработан фирмами «Корф Инжиниринг» (Германия) и «Фест-Альпине» (Австрия), и в конце 1989 г. был введен в эксплуатацию первый промышленный комплекс Corex-1000 с фактической производительностью 315 тыс. т чугуна в год на заводе фирмы «Искор» в Претории (ЮАР). Схема процесса приведена на рис. 5.

Кусковую руду, агломерат или окатыши загружают в восстановительную шахту, в которой они восстанавливаются газами до 90 % степени металлизации. Образовавшееся губчатое железо транспортером подают в плавильную камеру, в которой происходит окончательное восстановление, плавление и нагрев расплава. Через определѐнные промежутки времени выпускают чугун и шлак. В чугуне содержится 0,3 % S и 0,16 % P. Для получения чугуна расходуется 1500 кг/т руды, 1200 кг/т угля, 420 кг/т флюсов и около 600 м^3/т кислорода. Восстановительный газ образуется в плавильной камере *20*, в которой газифицируется уголь. В этой камере развиваются высокие температуры (выше 1000°С), поэтому углеводороды, выделяющиеся из угля в присутствии кислорода, превращаются в оксиды углерода и водорода. В газовом потоке выносится большое количество пыли, частиц железа. Мелкая пыль задерживается в циклоне *16* и возвращается обратно в плавильную камеру. Восстановительный газ подается в восстановительную шихту. Температура восстановительного газа регулируется добавкой к нему охлажденного газа *18*, который получают охлаждением части восстановительного газа в скруббере *17* до 800…850 °С.

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

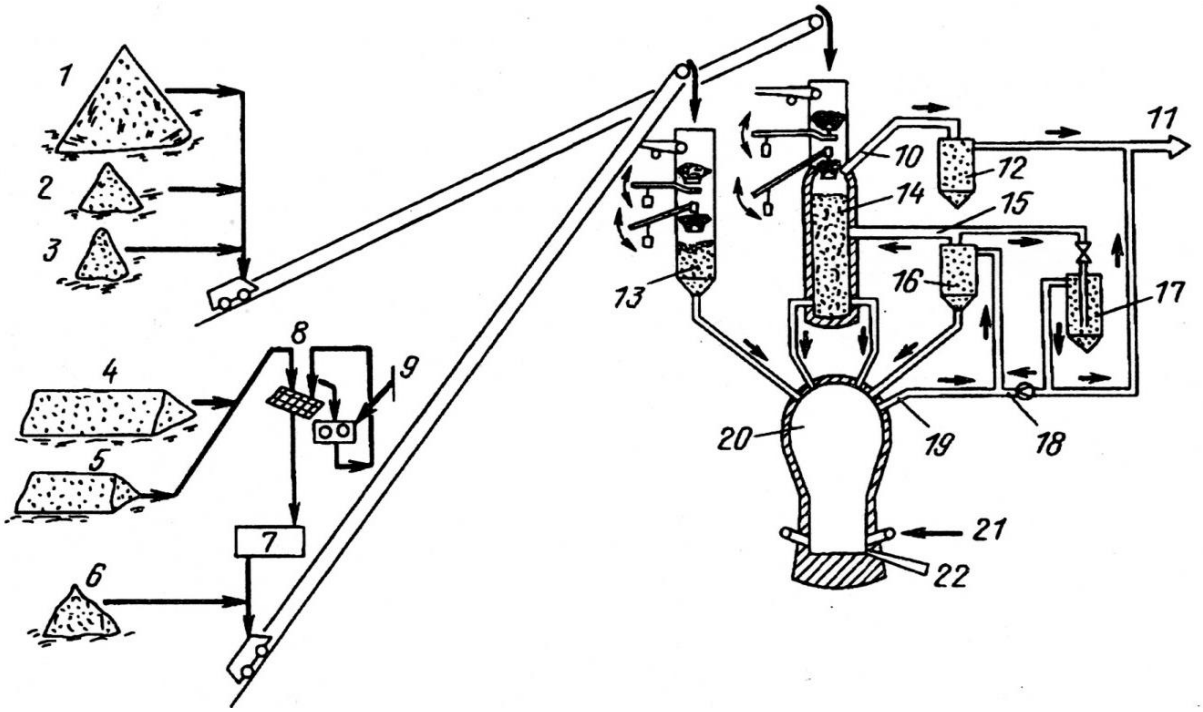


Рис. 5. Схема установки и технологического процесса «Корекс»:
1 – железная руда; *2* – известь; *3* – доломит; *4* – уголь; *5* – кокс; *6* – песок;
7 – осушительное устройство; *8* – грохоты; *9* – дробилка; *10* – выход колошникового газа;
11 – отходящие газы; *12* – скруббер колошникового газа; *13* – система подачи угля;
14 – восстановительная шахта; *15* – восстановительный газ; *16* – циклон для горячей пыли;
17 – скруббер охлаждающего газа; *18* – охлаждающий газ; *19* – продукты газификации;
20 – плавильный агрегат-газификатор; *21* – кислород; *22* – выпуск металла и шлака

Газ, выходящий из восстановительной шахты после очистки и охлаждения, может использоваться как топливо в паровых котлах или в установках твердофазного восстановления.

Процесс «Ромелт». Этот процесс был разработан в России. Схема процесса представлена на рис. 6.

Восстановительная плавка происходит в жидкошлаковой ванне. Ванну продувают кислородом. Восстановителем и топливом является уголь. Шихта загружается в печь сверху. Она состоит из руды, окатышей, флюсов. Восстановление оксидов железа происходит прямым и косвенным восстановлением в слое шлака. Восстановленный металл имеет состав: 4,2…4,5 % C; 0,2…0,3 % Si; 0,2 % Mn; 0,01…0,05 % P; 0,04…0,05 % S. Он накапливается в отстойнике и выпускается непрерывно или порциями из печи. Так же происходит и выпуск шлака. Через верхние фурмы *9* в печь подают воздушно-кислородное дутье для дожигания восстановительных газов. Тепло от сжигания газа большей частью возвращается в шлаковую ванну. Отходящие газы *7* направляют в котел-утилизатор.

В этом процессе происходит эффективная десульфурация. До 90 % всей серы уносится с отходящими газами. Фосфор в основном переходит в шлак, основность которого не менее 1.

Преимущество этого процесса состоит в использовании необогащенных железных руд и обычных энергетических углей. Попутно с производством железных сплавов в печи могут перерабатываться шлаки цинкового и ванадиевого производства с улавливанием содержащихся в них цинка и ванадия. Установки «Ромелт» могут быть использованы и для переработки бытовых отходов с улавливанием вредных газов.

Основными достоинствами технологии прямого восстановления железа являются

– устранение агломерационных и коксохимических производств;

– возможность получения чистого железа без таких нежелательных добавок, как сера и фосфор;

– резкое сокращение выбросов CO_2, так как восстановителем является водород;

– использование многих видов железорудного сырья – руды, концентратов, пыли, шламов, окалины, стальной стружки – без предварительной обработки;

– сокращение материала и энергоемкости.

При разработке и начале применения этих процессов считалось, что они станут альтернативой доменному процессу.

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

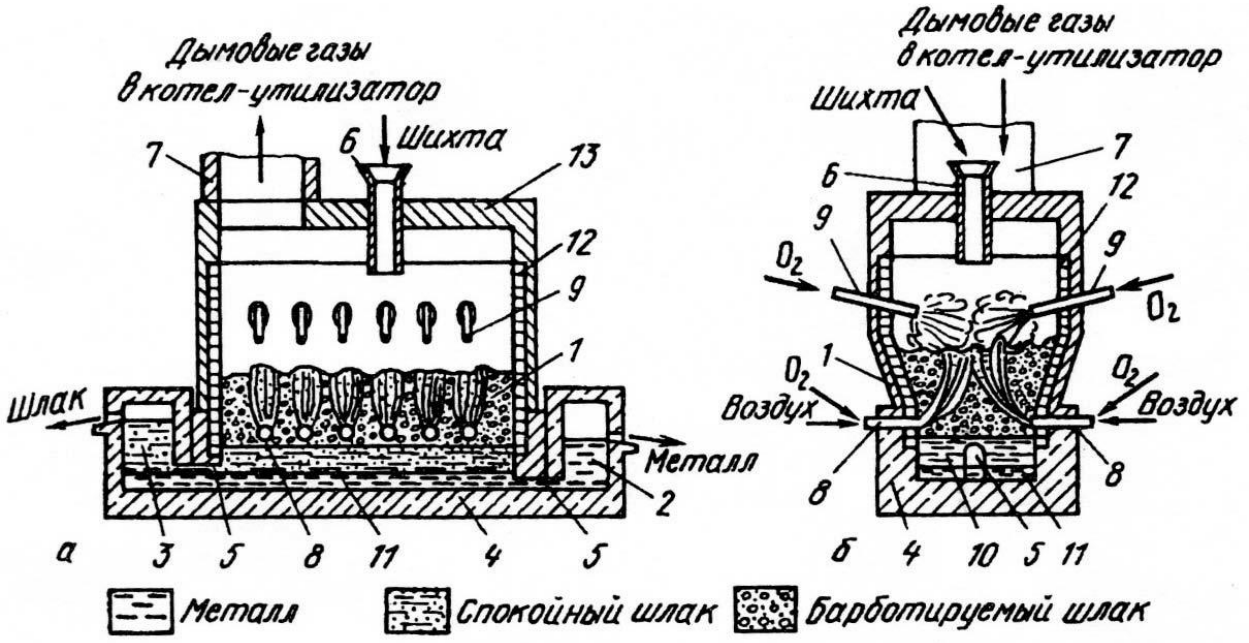


Рис. 6. Схема агрегатов и технологического процесса «Ромелт»:
а – печь «Ромелт»; *б* – котел-утилизатор; *1* – слой шлака; *2* – отстойник для металла (сфион);
3 – шлаковый сифон (отстойник); *4* – горн; *5* – проток шлака и металла; *6* – загрузочная воронка;
7 – отвод и подача дыма; *8* – барботажные фурмы нижнего ряда;
9 – верхние фурмы для дожигания; *10* – слой спокойного шлака; *11* – слой металла;
12 – водоохлаждаемые кессоны; *13* – свод

К настоящему времени можно отметить, что эффективно установки прямого восстановления железа могут работать только в регионах с недорогими источниками энергии. Этим и объясняется тот факт, что доля производства металлизованного сырья без применения кокса на регион Латинской Америки составляет 36 % от общего его производства, на Ближний Восток и Северную Америку – более 25 % и Азию – около 20 %.

Странами с наибольшими объемами производства металлизованного сырья являются: Венесуэла, Мексика, Индия, Иран, Саудовская Аравия.

Учитывая то, что свыше 90 % металлизованного сырья получают при использовании газообразного топлива (в подавляющем большинстве случаев – природного газа), становится ясно, что чем выше цена природного газа, тем менее эффективны эти процессы. Так, в Венесуэле, где цена на газ в 10 раз ниже европейских цен и имеется железная руда, стоимость тонны губчатого и горячебрикетированного железа на 30 % ниже, чем полученного на новой установке в Европе.

С другой стороны, существенное повышение цен на газ обусловило прекращение работы нескольких установок по производству губчатого железа в США, Мексике, Канаде и некоторых других странах. Во многих случаях выведенные из эксплуатации установки демонтируют и передислоцируют в страны с дешèвыми энергоресурсами.

В литературе имеются сведения, что с 1995 по 2005 гг. производство прямого восстановления железа выросло с 30,7 до 56 млн. т. Прогнозируется дальнейший рост производства такого материала до 80 млн. т в 2010 г. Это обусловлено повышением цен на металлолом.

И тем не менее, большие объемы металлопродукции еще достаточно долгое время будут производить в традиционных комплексах «доменная печь–конвертер». Одним из подтверждений этому служат данные работы [4]. Показано, что в период 1993-1999 гг. годовые объемы выплавки чугуна в мире колебались в пределах 500…550 млн.т, а в 2000-2005 гг. начался период интенсивного роста производства чугуна (ежегодные темпы роста составляли 6…10 %) и на конец 2006 г. оно достигло 871,6 млн. т. Главную роль в общемировом выпуске чугуна сыграли Китай, Индия, Япония, Южная Корея. На их долю приходилось 65 % мирового производства чугуна. По мнению автора работы [4], в пятилетней перспективе регион Юго-Восточной Азии останется мировым лидером в производстве чугуна.

Доля стран Европейского Союза (ЕС) составляет 25 % мирового производства чугуна. Ежегодный рост его производства составляет примерно 3 %. Он происходит, главным образом, за

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

счет стран – новых членов ЕС. Крупнейшими производителями чугуна в ЕС являются Германия (27 %), Франция (12 %), страны Бенилюкса (11 %), Италия (10 %), Великобритания (9 %).

Учитывая ужесточение экологических норм ЕС, можно ожидать сокращения производства чугуна. Тенденция снижения объемов выпуска чугуна наблюдается и в странах Северной Америки. В 2005 г. выплавку чугуна на 5 млн. т сократили США.

Однако сокращение объемов выплавки чугуна в этих регионах не свидетельствует о снижении его потребления. Дисбаланс компенсируется его импортом из Бразилии, Китая, ЮАР, Индии, России и Украины. На долю США приходится 35% общемирового импорта, стран ЕС – 30 %, Италии 10 %, Испании – 5 % [4].

Учитывая сложившееся в чѐрной металлургии Украины положение, когда в последние годы на металлургических предприятиях модернизировали доменное производство, товарный чугун может стать одним из основных видов экспортных поставок, наряду с заготовкой.

Ещѐ одним доводом в пользу доменного производства, а значит, и интегрированных металлургических заводов, является чѐтко выраженная тенденция применения чугуна в электросталеплавильном производстве (вплоть до 40 % от общего количества металлонесущей шихты).

В мире не только модернизируют интегрированные предприятия, но и строят новые. Так, фирма «Фест-Альпине» модернизировала расположенный в Донавице (Австрия) металлургический завод. После реконструкции на заводе действуют две доменные печи, установка десульфурации чугуна, два конвертера, две установки ковш-печь и три вакууматора, пятиручьевая блюмовая МНЛЗ, на которой отливают заготовки квадратного и круглого сечения, шестиклетевой непрерывно-заготовочный стан, рельсобалочный и проволочный станы. Часть блюмов и заготовок отгружают на сторону. Создан классический вариант интегрированного завода [5]. Есть и другие примеры.

Рассматривая принципиальный вопрос – могут ли заменить мини-заводы полностью предприятия с полным металлургическим циклом – следует констатировать: на ближайшие 30…50 лет – такой возможности нет. Но перспектива существует при условии, что на каждом из металлургических переделов интегрированных предприятий будут ***постоянно внедряться инновационные технологии***, в которых предусматривается максимальное использование ***совмещения процессов***, следующих друг за другом.

Список литературы

1. Минаев А.А. Совмещѐнные металлургические процессы: монография / А.А. Минаев. – Донецк: Технопарк ДонГТУ УНИТЕХ, 2008. – 552 с.
2. Лопухов Г.А. Ближайшие перспективы развития чѐрной металлургии / Г.А. Лопухов // Электрометаллургия, 2001. – №1. – С. 7-13.
3. Йин Р. Перспективы капиталовложений в агрегаты непрерывного литья тонких слябов и прокатки полосы в Китае / Р. Йин, Т. Ван // Чѐрные металлы, 1997. – Июнь. – С. 54-58.
4. Шейко А. Пока базальтернативный чугун / А. Шейко // Металл, 2007. – Октябрь. – С. 26-28.
5. Шѐлльнхаммер Х. Интегрированный компактный сталеплавильный завод фирмы VOEST-ALPINE STAHL DONAVITZ / Х. Шѐлльнхаммер, Г. Вольф, М. Эркер и др. // Чѐрные металлы, 1999. – Июнь. – С. 30-34.

Статья поступила 2.11.2021 г.
© А.А. Минаев, 2021

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

УДК 622.822.7:37

А.Л. Кавера /к.т.н./, Е.В. Курбацкий /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

Памяти Юрия Фёдоровича Булгакова (1953 – 2021 гг.),
выдающегося учѐного в области охраны труда и пожарной безопасности в угольной промышленности, доктора технических наук, профессора, директора института горного дела и геологии Донецкого национального технического университета, заместителя главного редактора сборника научных трудов «Вестник Донецкого национального технического университета»

Ю.Ф. БУЛГАКОВ – ПУТЬ В НАУКЕ К СОЗДАНИЮ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ



«У каждого человека в жизни есть двери, которые он боится или не хочет открывать, например, к зубному врачу, предчувствуя боль. Но есть двери, которые мы любим и хотим открывать, так как за ними трудятся высокопрофессиональные, преданные делу, благородные, умные и самоотверженные люди. И эти двери находятся в уникальном Государственном научно-исследовательском институте горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» (НИИГД «Респиратор»)». Именно так охарактеризовал Юрий Федорович Булгаков свой старт в науку в книге «НИИГД «Респиратор» в воспоминаниях современников» (Донецк, 2020 г.)

Настоящий ученый должен прочувствовать все, от теории до практики, от потребностей для страны до эффективного решения народнохозяйственных задач. Поэтому, после получения в ДПИ диплома горного инженера по специальности «Расчет и конструирование горных машин и комплексов» Юрий Федорович начал свой трудовой путь мастером механосборочного цеха на машиностроительном заводе им. Ленинского комсомола в г. Донецке. По окончании трехлетнего срока отработки молодым специалистом на заводе он задумался о более интересной и творческой работе, что и стало толчком старта в науку.

Это привело его в лабораторию пенных средств тушения пожаров НИИГД «Респиратор» в 1978 году.

Стремление к новому требовало нового, современного исследовательского оборудования. При отсутствии оного следовало им обзавестись. Сильно помогло то обстоятельство, что он пришел в НИИ с производства, поэтому, имея определенный опыт мастера сборочного цеха, немедленно принялся за создание лабораторных стендов, установок и приборов. С помощью отлаженных производственных связей удалось собрать стенд для производства взрывов метановоздушных смесей и ряд установок для определения физико-механических свойств пен, прибор для изучения реологических свойств двухфазных сред, поскольку в то время подобных приборов просто не существовало. Полностью отдавая себе отчет в том, что работать придется много, он сразу начал интенсивно искать свою научную нишу. И как показала жизнь, не ошибся.

Из воспоминаний Ю.Ф. Булгакова: «В то время я часто задавал себе вопрос: «Почему никому из ученых в голову не приходит мысль о том, чтобы опровергнуть теорему Пифагора?», и сам себе отвечал: «Потому, что она не затрагивает ничьих интересов!». Поэтому он хотел

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

найти именно свою проблему и решить ее. Начал с того, что собрал установку на экспериментальном полигоне и провел поисковую серию экспериментов. Работал по выходным дням, по-партизански. В последствии руководство лаборатории объяснило и опасность экспериментов без подстраховки, и то, что научные исследования – это коллективный труд, который обязательно должен заканчиваться положительным эффектом. За все это и была открыта первая научно-исследовательская работа Ю.Ф. Булгакова, в которой он был назначен ответственным исполнителем. Старт был дан.

Прошло несколько лет, удалось сдвинуть с места проблему тушения подземных пожаров. Особенно это касалось научного обоснования целесообразности применения пен в шахтах, опасных по газу и пыли, при потенциальной угрозе взрывов метано-воздушных смесей. Работа оказалась на редкость успешной. Исполнители НИР вплотную подошли к пониманию процессов движения неньютоновских жидкостей, к описанию реологических свойств пен, а также их структурно-механических свойств. Это позволило в дальнейшем, получив авторское свидетельство СССР на изобретение, предложить горноспасателям новый способ локализации взрывов при тушении пожаров в шахтах, опасных по газу и пыли.

Подобные исследования проводили и американские ученые, которые решали проблему защиты подводных лодок от действия взрывной волны.

Путь в неизведанное, в науку тернист, что подтверждают некоторые результаты работы лаборатории пенного пожаротушения.

Конечно, в работе были и неудачи. Так, практически без результатов закончились исследования по разработке технологии тушения пожаров искусственным снегом. Не дали положительных результатов и работы по применению огнетушащих аэрозолей в шахтных условиях в силу того, что они выносились воздушным потоком из зоны горения. При этом сотрудничество с российским космическим агентством «Союз» поначалу было весьма плодотворным: оно разрабатывало химические составы, а институт – конструкцию и технологию применения огнетушащих средств, но после развала СССР все работы были остановлены.

Дальнейшие исследования молодого ученого, он же председатель совета молодых ученых НИИГД «Респиратор», идут в трех параллельных направлениях: определение возможностей ликвидации пожаров в угольных и сланцевых шахтах, замкнутых объектах, на поверхностных объектах и морских судах с помощью огнетушащих пен, порошков и комплексов этих веществ. И все работы заканчивались экспериментальными, опытными и серийными изделиями, внедренными заказчиками в производство.

Работая в институте с 1978 года, Ю.Ф. Булгаков занимал должности: старшего инженера, младшего научного сотрудника, старшего научного сотрудника, заведующего лабораторией порошковых средств тушения пожаров и противопожарной защиты надшахтных комплексов, заведующего отделом тушения подземных пожаров, заведующего лабораторией комбинированных средств тушения пожаров.

Ю.Ф. Булгаков исследовал динамику развития пожаров в тупиковых выработках газовых шахт и характеристики ударных волн при взрыве метано-пылевоздушных смесей. Для этого потребовалось исследовать процессы локализации взрывных волн воздушно механической пеной на выброс.

Была создана уникальная экспериментальная установка, позволявшая визуально и с видеофиксацией проводить эксперименты, которые не давали возможности усомниться в пользе данного направления работ. А работы по натурным испытаниям погашения взрывов метано-воздушных смесей во взрывной штольне НИИГД «Гранит» и их демонстрации убедили руководство горноспасательной службы СССР и Минуглепрома СССР в перспективности дальнейших работ.

Для дальнейшего использования результатов работ были разработаны и внедрены в угольной промышленности тактико-технические рекомендации по применению способа локализации взрывов метано-воздушных смесей пеной при тушении подземных пожаров в тупиковых выработках шахт, опасных по газу и пыли. А в диссертационной работе аналогичного названия (1987г.) на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.26.01 – Техника безопасности и противопожарная техника , была изложена практически необходимая горноспасателям методика расчета характеристик защитной пенной пробки и технология ее создания, время накопления взрывоопасной концентрации метано-воздушной смеси при заполнении пеной тупиков аварийных участков, а также требования безопасности для таких технологий, что сохранило жизнь многим спасателям при ликвидации таких, самых опасных аварий.

В 80-е годы XX века были разработаны оригинальные конструкции, предназначенные для снижения интенсивности ударных волн. К ним относится перфорированная перемычка пара-

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

шютного типа, которая, не нарушая режима проветривания аварийного участка, должна обеспечить защиту людей от поражающего фактора взрыва. Как показали экспериментальные исследования, такая перемычка способна снизить давление на фронте ударной волны на 20 %. Несмотря на простоту установки и практически мгновенное срабатывание, перемычка не могла обеспечить полную локализацию взрыва, так как она не гасила фронт пламени, способный поджечь взрывоопасную смесь и тем самым генерировать новый скачок уплотнения.

Весьма перспективным средством локализации взрывов пыле-газовоздушных смесей явилась воздушно-механическая пена, обладающая целым комплексом уникальных свойств: хорошей текучестью, низкой скоростью распространения звуковых волн, высокой теплоёмкостью, малым удельным весом, способностью сжиматься под нагрузкой и накапливать упругую энергию и т.д. Однако в научных трудах ученых, работавших в этом направлении, наблюдалась некоторая несогласованность и противоречивость отдельных результатов.

Ю.Ф. Булгаковым была разработана физическая модель процесса, основанная на предположении о том, что взаимодействие газообразных продуктов взрыва с пеной характеризуется тремя стадиями, каждой из которых соответствует вполне определенное состояние пены. Физическая суть рассматриваемого процесса представляется следующим образом. При взрыве метановоздушной смеси выделяется определенное количество энергии, пропорциональное концентрации и объему взрывчатой смеси, а также удельной теплоте взрыва. При этом происходит повышение давления в забое выработки, вследствие чего начинается ускоренное движение фронта пламени, перед которым возникает скачок уплотнения, формирующийся в ударную волну и обусловленный трением потока о стенки выработки, а также автотурбуляцией пламени. Однако в результате взаимодействия газообразных продуктов взрыва с воздушно-механической пеной происходит интенсивный теплообмен между указанными средствами, в результате чего имеет место разрушение и испарение ячеек структурного каркаса двухфазной среды, что в свою очередь приводит к резкому увеличению энергозатрат взрыва, уменьшению скорости формирующейся ударной волны и трансформации ее в волну сжатия. Так как имеет место фазовый переход и, образующийся при испарении пены насыщенный пар, более сжимаем, чем жидкость, предельная скорость испарения двухфазной среды значительно меньше скорости звука в однородной жидкости. При этом испарение жидкой дисперсионной фазы прекратится в момент достижения газообразными продуктами взрыва температуры кипения раствора пенообразователя. С этого момента взрывная волна войдет во вторую зону, где механизм ее воздействия на пенную систему существенно изменится.

Если в первой зоне реологическое состояние пены теряло смысл, то во второй (зоне упругого сжатия), начинают проявляться структурно-механические свойства двухфазной среды. Полидисперсность пенных пузырьков приводит к увеличению толщины фронта взрывной волны на несколько порядков величины и способствует интенсивному рассеиванию энергии на границе раздела жидкости и газа. При этом происходит изменение структуры ячеек пенного каркаса и образуется высокоплотная структурированная система с повышенной дисперсностью, в результате чего резко возрастает суммарная площадь контакта пузырьков, что влечет за собой повышение величины динамического предела текучести. Изменение структуры пены сопровождается сжатием ее каркаса до момента равенства давления на фронте волны и динамического предела текучести двухфазной среды, после чего система «пена-взрыв» приходит к состоянию механического равновесия. Этот момент определяет начало релаксационных процессов, происходящих в третьей зоне, в пределах которой имеет место замедленное вязкопластическое течение пены с реологическими параметрами, определяемыми скоростью сдвига ячеек каркаса.

Диссипация энергии взрывной волны в третьей зоне происходит, в основном, за счет работы вязких сил и внутреннего трения пенных слоев. В момент равенства возмущающего импульса и статического предела текучести перестройка структуры пенного каркаса прекратится. Это определит конец процесса распространения взрывной волны в пенной среде и критическую длину пенной пробки, необходимую для локализации взрыва.

Следует отметить, что в момент окончания действия взрывной волны должно произойти обратное «восстановление» структуры пены, т.е. её движение в сторону, противоположную направлению действия взрыва. Это явится следствием действия упругой энергии, накопленной пенной системой в процессе сжатия. Кроме того, обратному «восстановлению» будет способствовать наличие волны разрежения в тупиковой части выработки. При длине пенной пробки меньше критической, т.е. отсутствии хотя бы одной из трех описанных зон, будет иметь место пре-

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

вышение энерговыделения над энергоемкостью пенной среды, в силу чего эффективность локализации взрыва резко снизится. Из вышеизложенного следует, что процесс локализации взрыва существенно зависит от структурно-механических и реологических свойств локализующей среды.

Экспериментальные исследования проводились на специально разработанной лабораторной установке, принцип работы которой основан на непосредственном взаимодействии взрыва метано-воздушной смеси на пенную среду. Для получения экспериментальных данных, сопоставимых с результатами натурных исследований, были соблюдены требования теории подобия и размерностей. Основными показателями, определяющими подобие взрыва метано-воздушных смесей, принимались критерии Маха и Струхаля. Для соблюдения подобия динамических характеристик воздушно-механической пены использовался метод эквивалентных материалов.

В ходе проведения экспериментов была подтверждена гипотеза об упруго-вязкопластическом поведении пены при взрывном нагружении. Установлено, что процесс объемного сжатия пены сопровождается увеличением еѐ плотности, а также изменением структуры в сторону увеличения дисперсности. Это явление общее для всех пен кратностью 30…750, дисперсностью 1,6…4 мм, полученных на основе пенообразователя ПО-1Д. При взрывном нагружении исчезает полидисперсность двухфазной среды – одна из главных причин схлопывания пузырьков, обусловленная различием их внутреннего давления. Структура пены становится практически монодисперсной, вследствие чего существенно повышается устойчивость. Установлено также, что наименьшей способностью к обратимым упругим деформациям обладают высокократные (500 и более) пены с низкой дисперсностью (5…6 мм). При этом пены кратностью 100…300, дисперсностью 1,5…2,5 мм обладают способностью к полному упругому восстановлению формы.

Для проверки адекватности разработанной модели процесса, а также определения надежности расчетного метода определения эффективной длины пенной пробки были проведены натурные эксперименты. Исследования проводились во взрывной штольне ВНИИГД, представляющей собой горизонтальную тупиковую горную выработку длиною 300 м и площадью поперечного сечения 9,8 м^2. Для измерения параметров ударных волн в штольне на расстоянии 30 м друг от друга устанавливали одиннадцать тензодатчиков с собственной частотой колебаний 10…12 кГц, работающих в комплекте с тензостанцией УТС-1-ВТ-12. Регистрация протекающих процессов производилась шлейфовым осциллографом К-115. Длина распространения пламени взрыва определялась по пленочным индикаторам, расположенным через один метр друг от друга по длине штольни. По результатам измерений определялись давление и скорость распространения взрывной волны, величины которых сравнивались с расчетными.

Эксперименты проводились следующим образом. В тупиковой части выработки при помощи диафрагмы из полиэтиленовой пленки образовывалась камера объемом 160 м^3, в которой создавалась взрывчатая (10 %) метано-воздушная смесь. Пена, генерируемая установкой «Буря», по вентиляционному трубопроводу диаметром 0,8 м и длиною 275…300 м подавалась в выработку. При этом пенная пробка длиною 150…250 м при кратности пены 150…200 создавалась за 10…15 минут. Расстояние между загазированной зоной и фронтом пены в выработке составляло от 5 до 50 м. Источником воспламенения газовоздушной смеси служила нихромовая проволока, нагреваемая током высокого напряжения до температуры разрушения (1600°С).

Анализ данных, полученных в экспериментах, показал, что при взрыве метано-воздушной смеси принятого объема по выработке распространялся комплекс возмущений, состоящий из ударной волны и зоны горения. Ударная волна формируется на удалении 50…55 м от места воспламенения смеси и со скоростью 377…475 м/с распространяется по выработке. При этом давление на фронте ударной волны составляло 0,13…0,17 МПа, а максимальное его значение было зарегистрировано в 160 м от инициатора взрыва.

В случае заполнения выработки воздушно-механической пеной на расчетную длину (при наличии зазора между пенной пробкой и загазированной зоной, равного 50 м), характер изменения давления на фронте волны был таким же, как и в воздухе. Однако абсолютное значение давления уменьшилось до 0,03 МПа, а скорость не превысила звуковую и изменялась от 105 до 233 м/с. Гашение пламени взрыва начиналось сразу же на границе контакта газообразных продуктов взрыва с пенной пробкой. При этом длина распространения пламени по пенной среде не превышала 12…15 м.

При тех же условиях эксперимента и отсутствии зазора между загазированной зоной и пенной средой, эффективность гашения падающей волны резко возрастала и в конце зоны диссипа-

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

ции энергии интенсивность волны уменьшалась в 8…10 раз. Анализ результатов исследований показал, что отличие фактической длины локализующей пенной пробки от расчетной не превышала 10 %.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований были разработаны научно обоснованные рекомендации по локализации взрывных волн воздушно-механической пеной, предложен новый эффективный способ локализации взрыва метано-воздушной смеси пеной при тушении подземных пожаров. Была получена зависимость длины пенной пробки от ее структурно-механических свойств, а также давления во фронте падающей волны. Установлено, что процесс локализации взрыва интенсифицируется при использовании высоковязких пен ($\mu \geq 1{,}2$ Н/м^2) по сравнению с пенами средней вязкости ($\mu \leq 0{,}5$ Н/м^2). Определены оптимальные характеристики воздушно-механической пены. Показана целесообразность применения пены кратностью 100…150. При этом установлено, что применение воздушно-механической пены кратностью менее 100 ограничивается условиями заполнения ею выработки по всему сечению, а использование пены кратностью 150 вызывает необходимость пропорционального удлинения пенной пробки для сохранения ее локализующих свойств.

Разработана методика расчета характеристик локализующей пенной пробки, включающая определение параметров взрывной волны, выбор способа подачи воздушно-механической пены и расчет времени заполнения ею аварийного участка. Указанная методика включена в «Рекомендации по локализации взрыва метано-воздушных смесей пеной при тушении подземных пожаров в тупиковых выработках шахт, опасных по газу и пыли». Указанные рекомендации вошли составной частью в «Руководство по локализации и тушению подземных пожаров пенами», предназначенное для оперативных подразделений ВГСЧ Минуглепрома СССР и используемое при составлении планов ликвидации аварий.

Способ локализации взрыва метано-воздушных смесей при тушении подземных пожаров, заключающийся в применении воздушно-механической пены не только в качестве традиционного огнегасительного средства, но и в качестве взрывоподавляющего вещества, реализуется с помощью установок «Буря».

Применение разработанного способа позволило значительно сократить количество изолируемых подземных пожаров за счет активного их тушения.

Это был результат первого этапа работы Ю.Ф. Булгакова по обеспечению безопасности ведения горных работ и горноспасательному делу. Далее следуют ряд опытно-конструкторских разработок промышленных образцов изделий противопожарного направления и рекомендаций по обеспечению противопожарной защиты объектов по добыче полезных ископаемых подземным и открытым способом. Были разработаны: автоматическая система локализации взрыва СЛВА, ряд порошковых шахтных огнетушителей вместимостью на 2,5 и 10 кг, пенный закачной и баллонный огнетушители, порошково-пенный огнетушитель для первичного тушения пожаров, установки порошкового тушения УП-250 и УП-500. Принимал активное участие в разработке самоходной пожарной установке типа «Исход» для комбинированного тушения пожаров в начальной стадии на открытых палубах, строящихся авианесущих кабелей, а также порошково-пенного огнетушителя возимого Р-14 для применения на кораблях ВМФ. В 1988 г. институт принимал участие в разработке системы противопожарной безопасности подземных противоатомных убежищ с устойчивостью к сейсмическим перегрузкам до 20 g.

До 2000 г. Ю.Ф. Булгаков руководил рядом работ по разработке рекомендаций по обеспечению противопожарной защиты торговых объектов и складов, цехов Енакиевского металлургического завода, других производств. Эти рекомендации заканчивались реальными результатами – системами оповещения, обнаружения, тушения, монтажом их силами сотрудников подразделения, которыми руководил Юрий Федорович, запуском в эксплуатацию. Реальный результат был налицо, институт получал благодарственные письма, своевременную оплату договоров и отличную рекламу надѐжного партнѐра.

Получив опыт в обеспечении противопожарной защиты объектов народного хозяйства, Ю.Ф. Булгаков приступил к обобщению результатов своего труда, подготовил и защитил в 2000 г. диссертацию на соискании ученой степени доктора технических наук по специальности 05.26.01 «Охрана труда» под названием «Способы и средства порошкового и пенного тушения сложных подземных пожаров».

В работе обоснована и экспериментально подтверждена возможность значительного увеличения дальности транспортирования огнетушащих порошков по сети горных выработок к очагу пожара за счет использования кулоновской силы притяжения разноименно заряженных аэродисперсных частиц порошка и пламени, обладающего собственным электрическим полем. Выполненными исследованиями доказано, что

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

эффективная дальность тушения в данном случае может быть увеличена на 25…30 %. По результатам исследований разработаны «Рекомендации по увеличению дальности подачи огнетушащего порошка за счет взаимодействия разнополюсных электрических зарядов порошкового факела и очага пожара», которые предназначены для использования оперативными подразделениями ГВГСС.

Для инертизации атмосферы пожарных участков автором предложен способ и установки для получения газообразного азота непосредственно из шахтного воздуха с помощью газоразделительных селективных мембранных модулей. Получена аналитическая зависимость для определения производительности мембранной установки по газообразному азоту, позволяющая в аварийных условиях рассчитывать количество мембранных модулей, необходимое для инертизации атмосферы пожарного участка. Применение мембранных газоразделительных установок позволяет значительно сократить энергоемкость, трудоемкость, и, в конечном счете, стоимость работ, за счет получения газообразного азота из шахтного воздуха непосредственно на аварийном участке.

Впервые исследованы взрывогасящие свойства обрушенных горных пород при пожарах в выработанном пространстве лав. Разработана физическая модель процесса гашения взрыва обрушенными горными породами и дано ее математическое описание. Показано, что в результате дренирования взрывных газов через обрушенные горные породы происходит редуцирование давления и гашение пламени во фронте взрывной волны. Получено выражение, позволяющее определять необходимую ширину защитной породной полосы в зависимости от параметров возможного взрыва и кусковатости обрушенных пород. Выполненные исследования легли в основу разработки «Рекомендаций по отработке лав при пожаре в выработанном пространстве».

На основе комплексной оценки технического уровня шахтных огнетушителей обоснованы направления повышения их огнетушащей эффективности. Наиболее перспективным является создание огнетушителей комбинированного действия, позволяющих использовать одновременно огнетушащие вещества и составы, обладающие различными физико-химическими свойствами, обеспечивающими «синергизм огнетушащего эффекта». Разработаны и испытаны конструкции новых перспективных типов огнетушителей: десятилитрового аэрозольно-пенного и сорокалитрового порошково-пенного возимого огнетушителя. Показано, что огнетушители комбинированного действия обладают повышенной на 50-60 % огнетушащей эффективностью и способны тушить пожары классов А, В, С, Д и возгорания электрооборудования, находящегося под напряжением до 1140 В. Разработаны методики расчета конструктивных и технологических параметров огнетушителей комбинированного действия. Разработанные огнетушители нашли широкое применение не только на предприятиях угольной промышленности, но и в системе противопожарной защиты кораблей ВМФ Украины и России.

Ю.Ф. Булгаковым также решена задача повышения огнетушащей эффективности шахтных передвижных и стационарных установок пожаротушения. Так, на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов развития пожаров в выработках, оснащенных ленточными конвейерами, была разработана автоматическая порошково-пенная установка типа УПП-2, которая успешно прошла предварительные и приемочные межведомственные испытания. Широкое применение таких установок позволит существенно повысить уровень противопожарной защиты ленточных конвейеров за счет обеспечения возможности тушения пожаров в начальной стадии развития.

Для повышения эффективности тушения развитых пожаров разработана порошково-аэрозольная шахтная установка. На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований найдено оптимальное сочетание порошкового и аэрозольного компонентов, обеспечивающих повышение эффективности тушения пожаров на 40 % по сравнению с известными аналогами. В промышленных условиях отработаны оптимальные режимы работы установки.

Для повышения эффективности противопожарной защиты надшахтных поверхностных комплексов, зданий и сооружений, а также пожароопасного горношахтного оборудования, машин и механизмов, созданы новая шахтная автоматическая система пожаротушения типа САПР-1 и ее модификации. На основе комплексного подхода разработана концепция создания современных шахтных автоматических систем, основанных на принципе мониторинга состояния окружающей среды. Разработан алгоритм выбора типа автоматической системы пожаротушения для каждого конкретного случая, обоснован выбор основных параметров системы. Экспериментальные исследования и натурные испытания показали надежность и подтвердили высокую эффективность таких систем. Разрабо-

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

тана методика расчета параметров шахтных автоматических установок, входящих в состав системы противопожарной защиты объектов, а также методика определения огнетушащей эффективности шахтных автоматических систем пожаротушения. Указанные системы широко применяются сегодня на предприятиях угольной промышленности и других отраслях народного хозяйства Украины, России и других стран СНГ.

В 2000 г. Ю.Ф. Булгаков перешел на работу в Донецкий национальный технический университет на должность заведующего кафедрой «Охрана труда и аэрология». С 2002 по 2010 гг. работал в должности декана горного факультета, с 2010 по 2016 гг. – проректор по научно-педагогической работе, с 2016 по 2019 гг. проректор по научной работе. Занимал должность директора Института горного дела и геологии ДонНТУ, заведующего кафедрой «Охрана труда и аэрология». Опубликовал более 250 научных трудов , в том числе11 монографий: «Тушение подземных пожаров» (2001), «Интеллектуальная собственность» (2005), «Поддержание и проветривание глубоких шахт Донбасса» (2008), «Справочник по разработке крутых и крутопадающих пластов» (2008), «Охрана труда в угольной промышленности» (2010), «Предупреждение и тушение подземных эндогенных пожаров в труднодоступных местах» (2010), «Компьютерное моделирование аварийных вентиляционных режимов» (2014), «Индивидуальная противогазотепловая защита» (2015), «Пылевая опасность угольного производства» (2017), «Практикум по охране труда в угольной промышленности» (2017), «Безопасность работ и охрана труда в угольной промышленности» (2019).

Подготовил 6 кандидатов технических наук, руководил подготовкой специалистов по направлению «Технологическая безопасность и горноспасательное дело». Преподавал следующие дисциплины: рудничные пожары и взрывы; пожарная безопасность, охрана труда в угольной отрасли.

Награждѐн знаками «За доблестную службу Государственного комитета промышленной безопасности и горного надзора II степени, «За заслуги ГУ МЧС Украины», «Заслуженный шахтѐр Украины», именной медалью Министра угольной промышленности Н.С. Сургая; полный кавалер знаков «Шахтѐрская слава» и «Шахтѐрская доблесть», имеет шахтѐрские награды Чехии и Польши.

Много лет сотрудничал от имени ДонНТУ с чешскими и польскими учеными и учебными институтами в области противоаварийной защиты угольных предприятий, подготовки новых инженерных кадров в сфере технологической безопасности.

Принимал участие в расследовании причин возникновения и ликвидации многих аварий на шахтах Украины и ДНР.

Сотрудничество Ю.Ф. Булгакова с НИИГД «Респиратор» ГВ ГСС МЧС ДНР, МакНИИ, ДонУГИ, Гортехнадзором ДНР, Санэпиднадзором, Академией гражданской защиты МЧС ДНР, шахтами и Министерства экономики и угольной промышленности ДНР приносит плоды не только в области техногенной безопасности и охраны труда, но и в повышении качества знаний по изучаемым на кафедре «Охрана труда и аэрология» предметам. Дипломные работы выпускников кафедры посвящены улучшению условий труда работников шахт ГУП «ДУЭК», «Макеевуголь», «Торезантрацит», ГВГСС МЧС ДНР, заводов. Созданная Ю.Ф. Булгаковым школа педагогов и аспирантов кафедры продолжает функционировать. Сейчас готовится к защите диссертационная работа, посвященная нормализации микроклимата в стеснѐнных горно-геологических условиях шахты при аварийно-спасательных работах шахтѐров и горноспасателей, а также продолжаются диссертационные исследования в направлении повышения безопасности горных работ путѐм применения воздушно-механической пены при технологических и аварийных взрывах в горных выработках шахт.

Сведения об авторах

А.Л. Кавера
SPIN-код: 6992-4634
Author ID: 846659
Телефон: +380 (71) 334-89-06
Эл. почта: alexey.kavera@ro.ru

Е.В. Курбацкий
Телефон: +380 (71) 340-95-45
Эл. почта: donevk@gmail.com

Статья поступила 07.12.2021 г.
© А.Л. Кавера, Е.В. Курбацкий, 2021

УДК 66.011

А.Б. Бирюков /д.т.н./, П.А. Гнитиѐв /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ

На практике, зачастую, возникает проблема, связанная с эрозией внутренней поверхности дымовой трубы. Отслеживание процесса износа целесообразно производить при помощи периодической диагностики. В качестве одного из рациональных вариантов решения данной задачи в статье разработана методика диагностики состояния внутренней поверхности дымовой трубы в рамках методологии тепловой диагностики. Толщина материала стенки трубы определяется для измеренного значения температуры наружной поверхности трубы с учетом значений следующих параметров: наружный диаметр трубы, коэффициенты конвективной теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях трубы, приведенный коэффициент излучения от наружной поверхности в окружающую среду, температура продуктов сгорания на исследуемом горизонте трубы, температура окружающей среды и коэффициент теплопроводности материала стенки трубы. В результате оценки параметрической чувствительности методики установлено, что наибольшее влияние на результат оказывают погрешности задания характерных температур процесса и измерения температуры наружной поверхности трубы.

Ключевые слова: *дымовая труба, неразрушающий контроль, тепловая диагностика, продукты сгорания, теплопередача, коэффициент теплоотдачи, температура поверхности, толщина стенки.*

Постановка проблемы

При эксплуатации дымовых труб зачастую возникает эрозия внутренней поверхности, связанная с агрессивным воздействием дымовых газов (прежде всего сернокислотная коррозия). Поскольку одним из актуальных направлений развития современного предприятия является комплексная диагностика состояния всех элементов оборудования, целесообразным является решение вопроса о создании метода неразрушающего контроля, позволяющего периодически проводить контроль состояния внутренней поверхности стенок дымовой трубы. Очевидно, что при технической возможности внутренней телеметрии такой подход в большинстве случаев не является рациональным. Наиболее перспективным в данном случае является метод тепловой диагностики.

Анализ последних исследований и публикаций

Разработке методов тепловой диагностики посвящено достаточно большое количество исследований отечественных и иностранных авторов [1…10]. При этом в значительной мере внимание сосредоточено на технической стороне решения этих вопросов: выбор пирометров и тепловизоров и способы идентификации «проблемных участков» на основании идентификации отклонений температурного состояния исследуемых поверхностей материалов и оборудования от номинального уровня.

Так, например, на рис. 1 представлена термограмма и фотография верхней части дымовой трубы котельной с дефектом оголовка. Тепловизионное обследование позволяет определить местные температурные аномалии на поверхности ствола трубы с помощью инфракрасной техники, при которой проявляются некачественные швы бетонирования, трещины несущего ствола, понижение сопротивления газопроницаемости материала, зоны разрушения ствола или футеровки, нарушение или отсутствие теплоизоляции и т.п. С точки зрения применения тепловизионного метода, дефекты ограждающих конструкций дымовой трубы, работающей в переменном температурном режиме и часто в агрессивной среде, можно условно разделить на 2 группы:

- дефекты, связанные с нарушением целостности ограждающих конструкций (трещины, разрушения несущего слоя бетона, нарушение футеровки, коррозия и т.д. и т.п.);
- дефекты, связанные с изменением теплопроводности и сопротивления газопроницаемости материалов (пористости бетона, образование пустот, изменение влажности и т.д.).

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

Безусловно такой метод диагностики более наглядный, однако он не лишен недостатков: полученное изображение является качественным и зачастую не позволяет произвести количественные оценки.

В целом интерпретация результатов основывается на общих закономерностях теплопередачи, но имеет существенные особенности в связи с различной спецификой диагностируемых процессов.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является создание методики диагностики состояния внутренней поверхности дымовой трубы в рамках общей методологии тепловой диагностики.

Основной материал

При эксплуатации дымовых труб зачастую возникает эрозия внутренней поверхности, связанная с агрессивным воздействием дымовых газов (прежде всего сернокислотная коррозия). В то же время при движении продуктов сгорания вверх по трубе имеют место потери теплоты, связанные с теплопередачей от продуктов сгорания в окружающую среду. Дальнейшие выкладки основаны на предположении об идеальной газоплотности стенки трубы и относятся к случаю однослойной стенки. Полное термическое сопротивление на пути распространения теплоты складывается из трех составляющих: сопротивления теплоотдаче от продуктов сгорания (конвекцией и излучением) к внутренней поверхности дымовой трубы $R_в$, сопротивления передаче теплоты теплопроводностью через стенку трубы $R_т$ и сопротивления передаче теплоты (конвекцией и излучением) от наружной поверхности стенки трубы в окружающую среду $R_н$.

Линейная плотность теплового потока, передаваемая на определенном горизонте трубы в окружающую среду, вычисляется как [11]:

$$q = \frac{t_{пс} - t_{ос}}{R_в + R_т + R_н} \qquad (1)$$

где $t_{пс}$ – температура продуктов сгорания на рассматриваемом горизонте трубы, °С; $t_{ос}$ – температура окружающей среды, °С.

Элементарные термические сопротивления с учетом передачи теплоты через цилиндрическую стенку определяются следующим образом:

$$R_т = \frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_н}{d_в}\right), \qquad (2)$$

$$R_в = \frac{1}{\pi d_в \alpha_в}, \qquad (3)$$

$$R_н = \frac{1}{\pi d_н \alpha_н}, \qquad (4)$$

где $d_н$ – наружный диаметр трубы на рассматриваемом горизонте, м; $d_в$ – определяемое в результате расчета значение внутреннего диаметра трубы; $\alpha_в$ – итоговое значение коэффициента теплоотдачи от продуктов сгорания к внутренней поверхности трубы, Вт/(м^2·К); $\alpha_н$ – итоговое значение коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности трубы в окружающую среду, Вт/(м^2·К).

Значение $\alpha_н$ определяется как:

$$\alpha_н = \alpha_{н.луч} + \alpha_{н.конв}, \qquad (5)$$

где $\alpha_{н.луч}$, $\alpha_{н.конв}$ – лучистая и конвективная составляющие итогового коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности трубы в окружающую среду, Вт/(м^2·К).

Значение $\alpha_{н.луч}$ находим при помощи выражения:

$$\alpha_{н.луч} = \left(c_{пр} \cdot \left[\left(\frac{t_н + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{ос} + 273}{100} \right)^4 \right] \right) \times \times \left(t_н - t_{ос} \right)^{-1} \qquad (6)$$



Рис. 1 Термограмма и фотография верхней части дымовой трубы котельной с дефектом оголовка

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

где $t_н$ – измеренное значение температуры поверхности трубы, °С; $C_{пр}$ – приведенное значение коэффициента излучения от наружной поверхности трубы в окружающую среду, Вт/(м^2·К^4).

Величины $\alpha_{н.конв}$, $\alpha_в$, $C_{пр}$ определяются при помощи классических зависимостей, представленных, например в [11].

Поскольку термическое сопротивление стенки трубы зависит от ее толщины и теплопроводности материала (материалов), из которого она состоит, идентификация количественного значения этого термического сопротивления позволяет перейти к толщине стенки трубы.

Так как в стационарном режиме через каждое из термических сопротивлений проходит одна и та же линейная плотность теплового потока, можно записать следующее соотношение:

$$q = \frac{t_{пс} - t_{ос}}{R_в + R_т + R_н} = \frac{t_{пс} - t_н}{R_в + R_т}, \qquad (7)$$

разрешая которое относительно $R_т$, получаем:

$$R_т = -R_в + R_н \cdot \frac{t_{пс} - t_н}{t_н - t_{ос}}. \qquad (8)$$

В конечном итоге с учетом выражений (2…8) получаем следующее трансцендентное уравнение, из которого можно определить искомое значение $d_в$:

$$\frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_н}{d_в}\right) = -\frac{1}{\pi d_в \alpha_в} + \left(\pi d_н \frac{c_{пр} \cdot \left[\left(\frac{t_н}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{ос}}{100}\right)^4\right]}{t_н - t_{ос}} + \alpha_{н.конв} \right)^{-1} \times \frac{t_{пс} - t_н}{t_н - t_{ос}} \qquad (9)$$

Остаточное значение толщины стенки трубы по рассмотренному радиальному направлению определяется как:

$$\delta = \frac{d_н - d_в}{2} \qquad (10)$$

Таким образом, составлен научный инструментарий, который позволяет на основании результата измерения температуры наружной поверхности стенки трубы определить остаточную толщину стенки трубы.

Параметрами, необходимыми для решения этой задачи являются: $d_н$, $\alpha_в$, $\alpha_н$, $C_{пр}$, $t_{пс}$, $t_{ос}$, λ.

Для использования разработанной методики оценки погрешности полученного результата необходимо провести исследование параметрической чувствительности модели к погрешностям определения обозначенных выше параметров задачи и температуры наружной поверхности дымовой трубы.

В качестве базовой точки выбран результат, соответствующий следующему набору значений параметров задачи: $d_н$=2,5 м; $\alpha_в$=10 Вт/(м^2·К); $\alpha_н$=10 Вт/(м^2·К); $C_{пр}$=4 Вт/(м^2·К^4); $t_{пс}$=130 °С; $t_{ос}$=0 °С; λ=1,1 Вт/(м·К) при результате замера температуры наружной поверхности трубы $t_н$=22,2 °С.

В результате идентификации значения толщины стенки трубы получено значение 0,231 м.

Ниже проведено исследование влияния отклонений таких параметров как $\alpha_в$, $\alpha_н$, $C_{пр}$ и λ на следующие величины в %:

-10	-7,5	-5	-2,5	2,5	5	7,5	10

а также характерных температуры $t_{пс}$, $t_{ос}$ и измеренного значения температуры наружного воздуха $t_н$ на следующие значения в °С:

-5	-4	-3	-2	-1	1	2	3	4	5

Результаты численных экспериментов систематизированы в табл. 1…2.

Оценка параметрической чувствительности предлагаемой методики выявила, что для коэффициента конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности трубы и приведенного коэффициента излучения погрешность задания в 1 % приводит к погрешности идентифицированного значения толщины стенки менее, чем на 0,5 %. При этом для коэффициента конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности знаки погрешности параметра и результата диагностики совпадают, а для приведенного коэффициента излучения они противоположны. Для коэффициента конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности трубы и коэффициента теплопроводности погрешность задания в 1 % приводит к погрешности идентифицированного значения толщины стенки менее, чем на 1 %. Для коэффициента теплопроводности материала стенки знаки погрешности параметра и результата диагностики совпадают, а для коэффициента конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности трубы они противоположны.

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

Табл. 1 Результаты изучения влияния погрешности задания параметров модели на устанавливаемое значение остаточной толщины стенки

Параметры		Математическое выражение результата	Уровень погрешности параметра относительно базового значения								
			-10	-7,5	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	10
Относительная погрешность определения искомой величины	$\alpha_н$	$\frac{\delta(\alpha_н)-\delta_б}{\delta_б}\cdot 100,\%$	9,96	7,36	4,76	2,6	0	-2,17	-4,33	-6,49	-8,66
	$\alpha_в$	$\frac{\delta(\alpha_в)-\delta_б}{\delta_б}\cdot 100,\%$	-4,76	3,46	-2,17	-1,08	0	1,08	2,17	3,03	3,90
	$C_{пр}$	$\frac{\delta(C_{пр})-\delta_б}{\delta_б}\cdot 100,\%$	3,46	2,6	1,73	0,87	0	-0,87	-1,73	-2,38	-3,03
	λ	$\frac{\delta(\lambda)-\delta_б}{\delta_б}\cdot 100,\%$	-8,23	-6,06	-3,9	-2,17	0	2,17	3,9	6,06	8,23

Табл. 2 Результаты изучения влияния погрешности задания характерных температур на устанавливаемое значение остаточной толщины стенки

Параметры		Математическое выражение результата	Абсолютная погрешность задаваемого значения характерной температуры										
			-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
Относительная погрешность определения искомой величины	$t_н$	$\delta=\frac{\delta(t_н)-\delta_б}{\delta_б}\cdot 100,\%$	42,42	32,46	23,38	15,5	7,36	0	-6,49	-12,99	-18,62	-24,24	-29,0

Для температуры продуктов сгорания погрешность в 1 °С приводит к погрешности результата порядка 1 %, знаки погрешности параметра и результата совпадают. Для температуры окружающей среды погрешность в 1 °С приводит к погрешности результата около 5 %, при этом знаки погрешности параметра и результата также совпадают. Что касается результата измерения температуры наружной поверхности трубы, то погрешность в 1 °С приводит к погрешности результата около 7 %, а знаки погрешности данных измерения и результата диагностики – противоположны.

Вывод

Разработана методика, позволяющая на основании измеренного значения температуры наружной поверхности дымовой трубы диагностировать толщину стенки трубы (по направлению замера), через которую теплота передается теплопроводностью. Параметрами, необходимыми для решения этой задачи являются: наружный диаметр трубы, коэффициенты конвективной теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях трубы, приведенный коэффициент излучения от наружной поверхности в окружающую среду, температура продуктов сгорания на исследуемом горизонте трубы, температуры окружающей среды и коэффициент теплопроводности материала стенки трубы.

Оценка параметрической чувствительности показала особенное влияние точности определения температуры окружающей среды и точности измерения температуры наружной поверхности трубы на результаты диагностики. При дальнейшем развитии разработанной методики необходимо учитывать возможность неравномерного распределения значения коэффициента конвективной теплоотдачи по наружному периметру поверхности трубы на исследуемом горизонте, формируемого при обтекании трубы ветром.

Также в дальнейшем целесообразно прорабатывать возможность аппроксимации в полярной системе координат результатов диагностики для

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

ряда точек, равномерно расположенных по периметру исследуемого горизонта трубы, для последующего упрощения расчетов прочностных характеристик трубы.

Список литературы

1. Героев, А. Е. Тепловизионный контроль дымовых труб / А.Е. Героев // Вестник евразийской науки. – 2013. – № 3 (16). – С. 133.
2. Бабушкин, Р. А. Тепловизионная диагностика дымовых труб / Р.А. Бабушкин, Д.С. Гмызов Д.С., Ю.П. Иванов // Инновационная наука. – 2015. – № 9. – С. 52-57.
3. Усов, Н. А. Тепловизионное обследование дымовых труб / Н.А. Усов, Р.И. Бикбулатов, А.Р. Галимова // Научные исследования. – 2017. – № 2 (13). – С. 29-31.
4. Хан, В. В. Термография в энергоаудите / В.В. Хан, В.П. Попов, М.В. Половнѐв // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 10 (81). – С. 261-267.
5. Власов, А. Б. Особенности реализации метода количественной термографической диагностики при внедрении цифровых технологий / А.Б. Власов, К.Б. Аллояров // Вестник МГТУ. – 2019. – Т. 22. – № 4. – С. 484–495.
6. Dukovska L, Petkov V., Mihailov Em., Vasileva S. Image Processing for Technological Diagnosis of Metallurgical Facilities. Cybernetics and Information Technologies, Vol. 12, No 4, 2012, pp. 66–76.
7. Chou Y. and Yao L. Automatic Diagnostic System of Electrical Equipment Using Infrared Thermography, 2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition, Malacca, 2009, pp. 155–160.
8. Методика обследования дымовых труб тепловых электростанций визуальным способом и при помощи тепловизора (Отчет по договору 96-137-901-025, 1-й кв. 1996 г.). М.: ОРГРЭС, ПЛИТ, 1996.
9. Борисенко, В. Ф. Диагностирование теплового состояния электромеханического оборудования / В.Ф. Борисенко, А.И. Землянский, В.А. Сидоров, Е.В. Сидорова // Горные науки и технологии. –2019. – 4(3). – С. 188-201.
10. Нуржанов, Д. Х., (2018) Бесконтактная диагностика оборудования с применением тепловизоров / Д.Х. Нуржанов, А.С. Васильев, А.Ю. Подсякина, О.В. Москвитина, Н.С. Реута // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2018. – № 2. – С. 368-370.

Heat and mass transfer: Workbook for students of institutes and universities / S.I. Ginkul, V.V. Kravtsov, V.I. Sheludchenko, A.B. Birukov.– Donetsk: Nord-Press, 2006. – 291 p.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, P.A. Gnitiev /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)Donetsk National Technical University (Donetsk)

METHOD FOR DIAGNOSING THE STATE OF THE INTERNAL SURFACE CHIMNEY

Background. *Currently, industrial enterprises operate equipment that was put into operation decades ago. Over time, any node wears out, becomes obsolete, deformed and undergoes other changes that affect its performance properties. In the case of operation of chimneys, diagnosing its internal state is a difficult task. The purpose of this work is to create a method for diagnosing the state of the inner surface of the chimney within the framework of the general methodology of thermal diagnostics.*

Materials and/or methods. *As one of the rational options for solving this problem, the article developed a method for diagnosing the state of the inner surface of the chimney within the framework of the methodology of thermal diagnostics. The thickness of the pipe wall material is determined for the measured value of the temperature of the outer surface of the pipe, taking into account the values of the following parameters: the outer diameter of the pipe, the coefficients of convective heat transfer on the inner and outer surfaces of the pipe, the reduced coefficient of radiation from the outer surface to the environment, the temperature of the combustion products at the investigated horizon of the pipe, ambient temperature and thermal conductivity of the pipe wall material.*

Results. *A technique has been developed that makes it possible, on the basis of the measured value of the temperature of the outer surface of the chimney, to diagnose the thickness of the material (in the direction of measurement), through which heat is transferred by thermal conductivity. As a result of the evaluation of the parametric sensitivity of the technique, it was found that the errors in setting the characteristic temperatures of the process and measuring the temperature of the outer surface of the pipe have the greatest influence on the result.*

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

Conclusion. *Using the proposed calculation method, it is possible to determine the state of the inner surface of the chimney. This technique is useful for routine maintenance of the chimney, as well as for finding problem areas and preventing pipe destruction.*

Keywords: *chimney, non-destructive testing, thermal diagnostics, combustion products, heat transfer, heat transfer coefficient, surface temperature, wall thickness.*

Сведения об авторах

А.Б. Бирюков
SPIN-код: 3186-0680
Author ID: 7006918782
ORCID iD: 0000-0002-8146-2017
Телефон: +380 (62) 301-08-61
Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

П.А. Гнитиѐв
SPIN-код: 1943-4196
Author ID: 56916104300
ORCID iD: 0000-0001-9266-7969
Телефон: +380 (71) 321-50-15
Эл. почта: spyh@ya.ru

Статья поступила 07.12.2021 г.
© А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиѐв, 2021
Рецензент д.т.н., проф. Н.А. Ченцов



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

УДК 621.874

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА НА КРАНЕ С ПОДВИЖНОЙ ГРУЗОВОЙ ТЕЛЕЖКОЙ

Разработана математическая модель колебаний груза на подъемном кране с подвижной тележкой при заданных режимах разгона и торможения подъемного механизма и тележки. Модель учитывает взаимосвязь вертикальных и поперечных колебаний груза и позволяет выполнить оптимизацию режима работы крана. Выполнено моделирование на компьютере и установлены особенности процесса подъема и опускания груза при неравномерно движущейся тележке.

Ключевые слова: *математическая модель, груз, кран, подвижная тележка, колебания.*

Постановка проблемы

В промышленности широко используются подъемные краны с подвижной тележкой подъема грузов (башенные, мостовые, полукозловые и козловые). Отличительной особенностью таких кранов является то, что грузовая тележка в общем случае совершает двухмерное движение в горизонтальной плоскости. В связи с этим концевой груз кроме перемещения в вертикальном направлении также перемещается в поперечных направлениях. Такое совмещение во времени операций по подъему и перемещению груза обеспечивает повышение производительности подъемного крана. Однако в переходных режимах разгона и торможения механизмов крана возникают сложные пространственные колебания груза, амплитуды которых могут возрастать до недопустимых значений.

Анализ последних исследований и публикаций

В работах [1…6] рассмотрены вопросы математического моделирования колебаний грузов применительно к кранам с подвижной грузовой тележкой. Однако в них не учитывается взаимовлияние вертикальных и поперечных колебаний груза, возникающих при переходных режимах разгона и торможения механизмов кранов. В них также отсутствует сравнительный анализ поперечных колебаний при подъеме и опускании груза.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка математической модели колебаний груза в процессе его неравномерного перемещения подъемным краном с подвижной тележкой, учитывающей взаимосвязь вертикальных и поперечных колебаний, а также моделирование процесса колебаний подъема (опускания) и перемещения тележки.

Основной материал исследований

Рассмотрим простейший вариант (рис. 1) подъема или опускания груза в такого рода кранах, когда тележка совершает одномерное движение вдоль моста или стрелы. При разработке расчетной схемы и математической модели приняты следующие допущения: груз рассматривается как материальная точка; упругие и диссипативные свойства каната приняты линейными.

Будем считать, что перемещение тележки задано, и при этом скорость $V(t)=\dot{X}(t)$ и ускорение $a(t)=\dot{V}(t)=\ddot{X}(t)$ тележки изменяются так, как показано на рис. 2 (здесь $X(t)$ – текущая горизонтальная координата тележки, отсчитываемая от ее некоторого первоначального положения).

Задан также угол поворота $\varphi_б$ барабана, причем угловая скорость ω и угловое ускорение ε барабана подъемного механизма изменяются по аналогичным законам. Из этого следует, что аналогичным образом изменяется и длина отвеса каната. Таким образом, расчетная схема представляет собой математический маятник на упругой нити переменной длины с подвижной точкой подвеса.

Запишем координаты груза в форме

$$x_0=X(t)+l\sin\psi,\ y_0=l_0-\cos\psi,$$

где l_0 – начальная длина отвеса каната; l – текущая его длина; ψ – угол, образуемый отвесом подъемного каната с вертикалью.

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

После дифференцирования по времени получим проекции скорости груза

$$\dot{x}_0 = \dot{X}_0(t) + \dot{l}\sin\psi + l\dot{\psi}\cos\psi,$$
$$\dot{y}_0 = -\dot{l}\cos\psi + l\dot{\psi}\sin\psi.$$

Отсюда квадрат скорости груза определится в формуле

$$V_0^2 = \dot{X}^2 + 2\dot{X}(\dot{l}\sin\psi + l\dot{\psi}\cos\psi) + \dot{l}^2 + l^2\dot{\psi}^2,$$

а кинетическая энергия груза массой m будет иметь вид:

$$T = \frac{m}{2}[\dot{X}^2(t) + 2\dot{X}(t)(\dot{l}\sin\psi + l\dot{\psi}\cos\psi) + \dot{l}^2 + l^2\dot{\psi}^2]. \quad (1)$$

Упругое удлинение качающегося отвеса каната определим как разность намотанной на барабан длины каната $R_б\varphi_б$ и фактического сокращения длины каната на величину $(l_0–l)$ в текущий момент времени:

$$\delta l = R_б\varphi_б - (l_0 - l),$$

где $R_б$ – радиус барабана.

Тогда общая потенциальная энергия системы представится в форме

$$П = \frac{C_к}{2}[R_б\varphi_б - (l_0 - l)]^2 + mg(l_0 - l\cos\psi), \quad (2)$$

где $C_к=K/l_{ср}$ – коэффициент жесткости отвеса каната; K – коэффициент, зависящий от материала, диаметра и конструкции каната, а также от кратности полиспаста механизма подъема крана; $l_{ср}=l_0–R_б\varphi_б$ – «средняя» длина каната (без учета упругих деформаций).

Функция Лагранжа

$$L=T–П. \quad (3)$$

Диссипативная функция Рэлея для данной системы

$$R = \frac{\beta_к}{2}(R_б\omega + \dot{l})^2, \quad (4)$$

где $\beta_к$ – коэффициент сопротивления каната.

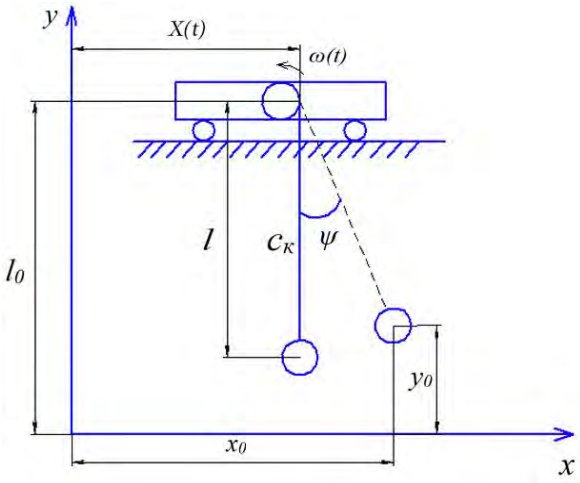


Рис. 1. Расчетная схема крана с подвижной тележкой

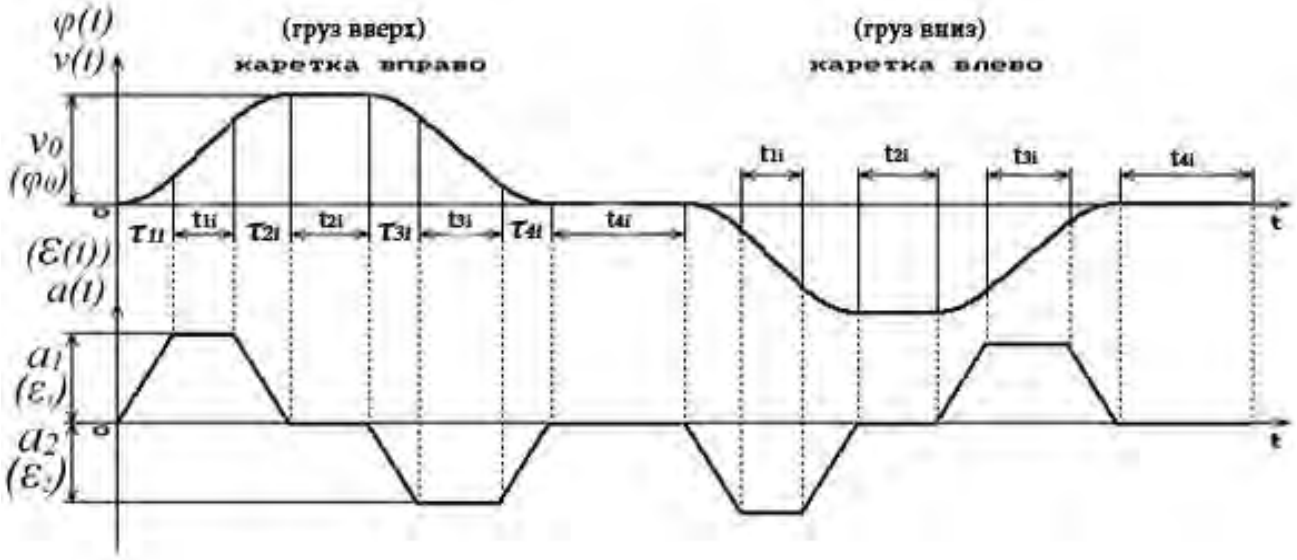


Рис. 2. Изменение скорости и ускорений тележки (каретки) при ее горизонтальном перемещении (i=1) и угловой скорости и углового ускорения барабана подъемного механизма (i=2)

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

В уравнениях Лагранжа

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial L}{\partial q_i}+\frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i}=0 \qquad (5)$$

в качестве обобщенных координат рассматриваемой системы целесообразно принять $q_1=l$, $q_2=\psi$, а обобщенные непотенциальные силы: $Q_1=0$, $Q_2=0$.

Теперь определим в соответствии с (1…5) частные производные от функции Лагранжа по обобщенным координатам:

$$\frac{dL}{dl}=-C_к[R_б\varphi_б-(l_0-l)]+mg\cos\psi+$$
$$+m\dot{X}\dot{\psi}\cos\psi+ml\dot{\psi}^2.$$

$$\frac{dL}{d\psi}=-mgl\sin\psi-m\dot{X}\dot{l}\cos\psi-ml\dot{X}\dot{\psi}\sin\psi.$$

Далее имеем:

$$\frac{dL}{d\dot{l}}=m\dot{l}+m\dot{X}\sin\psi,$$

$$\frac{dL}{d\dot{\psi}}=ml^2\dot{\psi}+ml\dot{X}\cos\psi,$$

$$\frac{\partial R}{\partial \dot{l}}=\beta_к(R_б\omega+\dot{l}),$$

и тогда уравнения колебаний груза будут иметь вид

$$\begin{cases} m(\ddot{X}\sin\psi+\ddot{l})+\beta_к(R_б\omega+\dot{l})+ \\ +C_к[R_б\varphi_б-(l_0-l)-mg\cos\psi-ml\dot{\psi}^2=0, \\ l\ddot{\psi}+\ddot{X}\cos\psi+2\dot{l}\dot{\psi}+g\sin\psi=0. \end{cases} \qquad (6)$$

Полученную систему нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с изменяющимися коэффициентами можно решить одним из численных методов, например, методом Рунге-Кутта. Для этого введем новые переменные

$$u_0=\dot{l},\ u_1=l,\ u_2=\dot{\psi},\ u_2=\psi.$$

Теперь можно решить систему относительно первых производных

$$\begin{cases} \dot{u}_0=g\cos u_3+u_1u_2^2-\dfrac{\beta_к(R_б\omega+u_0)}{m}- \\ -\dfrac{C_к(R_б\omega t-l_0+u_1)}{m}, \\ \dot{u}_1=u_0, \\ \dot{u}_2=-\dfrac{\ddot{X}\cos u_3+2u_0u_2+g\sin u_3}{u_1}, \\ \dot{u}_3=u_2. \end{cases}$$

Разработанная математическая модель использовалась для моделирования колебаний груза на полукозловом кране грузоподъемностью 40 т, предназначенном для погрузки и разгрузки контейнеров на НПО «Ясиноватский машиностроительный завод». При этом рассматривались режимы равномерного подъема и опускания грузов различной массы со скоростью 0,195 м/с при разгоне и торможении грузовой тележки согласно диаграмме на рис. 2. Установившиеся значения скорости тележки 0,1 м/с, ускорения тележки 0,1 м/с^2.

На рис. 3 показан график изменения во времени (сек) угла отклонений Ψ (рад) отвеса каната от вертикали при подъеме типичного для рассматриваемого крана груза массой 20 т.

Как видно из графика, груз совершает поперечные колебания с небольшой амплитудой (менее 0,5°) и частотой примерно 0,14 Гц, причем по мере подъема амплитуда уменьшается, а частота колебаний увеличивается. Это объясняется уменьшением длины каната при подъеме груза от 13,5 м до 3,5 м и соответствующим увеличением коэффициента жесткости каната, а также наличием демпфирующего слагаемого во втором уравнении системы (6). Изменение характера колебаний на 28 секунде объясняется началом процесса торможения тележки.

На рис. 4 показан график изменения во времени t (сек) упругой силы F (Н) в подъемном канате при подъеме груза массой 20 т. Упругая сила в отвесе каната, вследствие жесткого рывка, достигает значения, в 2 раза превышающего номинальное значение веса груза. С течением времени эти колебания затухают. Частота колебаний составляет в начале подъема 4,5 Гц, а затем повышается по мере уменьшения длины каната и повышения его коэффициента жесткости. Частота вертикальных колебаний груза значительно (примерно в 30 раз) больше частоты поперечных колебаний. Отсюда следует вывод о незначительной связанности продольных и поперечных колебаний груза для рассматриваемого крана.

При опускании груза характер динамических процессов существенно изменяется. Так на

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

рис. 5 приведен график изменения во времени (сек) угла отклонений Ψ (рад) отвеса каната от вертикали при опускании с постоянной скоростью 0,195 м/с груза массой 20 т. При опускании груза в рассматриваемом случае длина каната увеличивается от 3,5 м до 13,5 м. Процесс равномерного опускания груза при неравномерно движущейся тележке сопровождается ростом амплитуд поперечных колебаний груза (до 5,7°) с одновременным снижением их частоты от 0,2 Гц до 0,15 Гц. Такое раскачивание груза объясняется наличием слагаемого $2\dot{l}\dot{\psi}$ во втором уравнении системы (6). При подъеме груза скорость $\dot{l}$ в среднем положительная, поэтому слагаемое $2\dot{l}\dot{\psi}$ действует как демпфирующий фактор. При опускании груза скорость $\dot{l}$ в среднем отрицательная по знаку, поэтому слагаемое $2\dot{l}\dot{\psi}$ играет роль «возбуждающего» фактора. Очевидно, что уменьшить это «возбуждающее» влияние можно за счет снижения скорости опускания груза. Как показал вычислительный эксперимент, при уменьшении скорости опускания груза до 0,04 м/с амплитуда раскачивания груза увеличивается не существенно, угол отклонения каната от вертикали не превышает 0,86°. Таким образом, при опускании груза рассматриваемым краном с одновременным неравномерным движением тележки возможен существенный рост амплитуд раскачивания груза, что может представлять опасность для груза и оборудования крана. Снизить амплитуды раскачивания груза можно за счет уменьшения скорости его опускания.

Выводы

Разработана математическая модель в виде системы двух нелинейных дифференциальных уравнений 2-го порядка с изменяющимися коэффициентами, которая учитывает взаимодействие продольных и поперечных колебаний груза кранов с подвижной кареткой в переходных режимах работы. Процесс опускания груза при неравномерно движущейся тележке, в отличие от процесса его подъема, сопровождается ростом амплитуд поперечных колебаний.

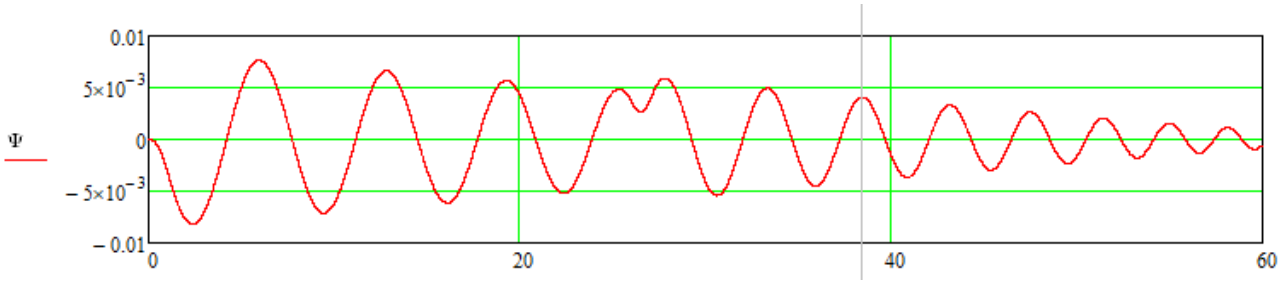


Рис. 3. График изменения во времени (сек) угла отклонений отвеса каната от вертикали (рад) при подъеме груза массой 20 т.

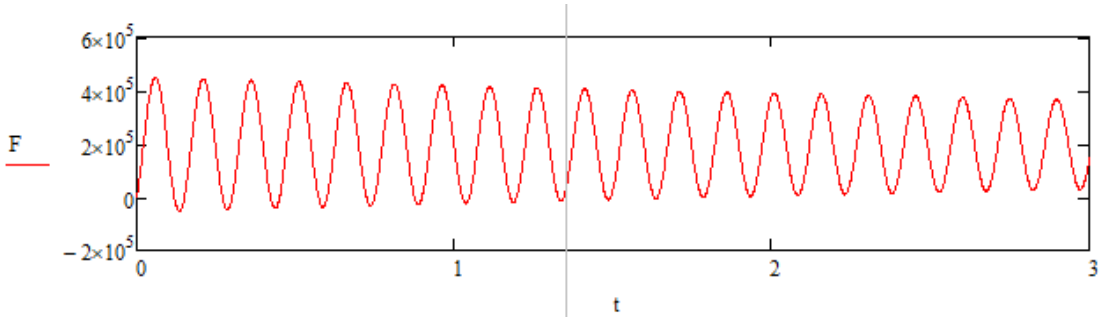


Рис. 4. График изменения во времени *t* (сек) упругой силы *F* (Н) в подъемном канате при подъеме груза массой 20 т.

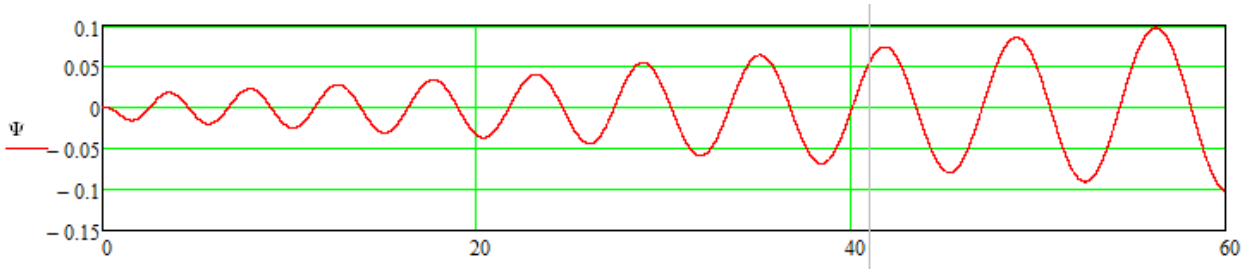


Рис. 5. График изменения во времени (сек) угла отклонений отвеса каната от вертикали (рад) при опускании груза массой 20 т.

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

Эффективно снижать амплитуды поперечных колебаний при опускании груза можно за счет снижения скорости опускания. Разработанная модель позволяет определить максимальные поперечные перемещения груза и максимальные динамические усилия в подъемном канате при любом заданном законе перемещения каретки и вращения барабана механизма подъема и может быть использована при оптимизации режима работы крана.

Список литературы

1. Комаров, М. С. Динамика грузоподъемных машин / М. С. Комаров. – М.: Машгиз, 1967. – 267 с.
2. Долотов, А.М. Раскачивание груза при пуске и остановке механизма перемещения / А.М. Долотов, С.В. Калашников // Механики XXI веку. – 2008. – №7. – С. 6-8.
3. Будиков, Л.Я. Многопараметрические исследования динамики мостовых кранов: Учебное пособие / Л. Я. Будиков. – Луганск: изд. Луганского национ. ун-та им. В. Даля, 2017. – 236 с.
4. Huasen Liu, Wenming Cheng, Yinqi Li / Dynamic Responses of an Overhead Crane's Beam Subjected to a Moving Trolley with a Pendulum Payload // Hindawi Shock and Vibration Volume 2019, Article ID 1291652, 14 pages https://doi.org/10.1155/2019/1291652.
5. Maximov,J.T., Dyunchev, V.P. Investigation of dynamic response of «bridge girder telpher-load» crane system due to telpher motion. Coupled Systems Mechanics, 2018, 7 (4), 485-507.
6. Raksha S. V. et al. MATHEMATICAL AND S-MODELS OF CARGO OSCILLATIONS DURING MOVEMENT OF BRIDGE CRANE //Scientific Bulletin of National Mining University. – 2019. – №. 2, 108-115.

V.P. Kondrakhin /Dr. Sci. (Eng.)/, V.E. Koshelev
Donetsk National Technical University (Donetsk)

MATHEMATICAL MODELING OF VERTICAL AND TRANSVERSAL LOAD VIBRATIONS ON A CRANE WITH A MOVABLE CARGO TROLLEY

Background. *In tower, bridge, semi-gantry and gantry cranes, the cargo moves in a horizontal plane with the help of a cargo trolley, while it is possible to combine the operations of lifting (lowering) the cargo and its transverse movements in time. In transient modes of acceleration and deceleration of crane mechanisms, complex spatial fluctuations of the load occur, the amplitudes of which can increase to unacceptable values.*

Materials and/or methods*. To study the process of load oscillations in the vertical and transverse directions, the method of mathematical modeling was used. The mathematical model of load oscillations is compiled using the Lagrange equation of the second kind. The solution of the system of differential equations was carried out by a numerical method using a package of mathematical applied programs.*

Results. *A mathematical model of vertical and transverse oscillations of the load has been developed in the form of a system of two non-linear differential equations of the 2nd order with varying coefficients, taking into account the presence of a dynamic connection between the vertical and transverse oscillations of the load and the uneven nature of its movement in both directions. The analysis of load oscillations is carried out on the example of a semi-gantry crane with a lifting capacity of 40 tons. It is established that the frequencies of vertical and transverse oscillations of the load differ significantly, which determines the weak dynamic coupling of dynamic subsystems. When lowering the load with simultaneous uneven movement of the trolley, dangerous swinging of the load with increasing amplitude can occur.*

Conclusion. *Using computer simulation of the process of lifting and lowering a load by a crane with a movable cargo trolley, it was found that the process of lowering a load with an unevenly moving trolley, in contrast to the process of lifting it, is accompanied by an increase in the amplitudes of transverse vibrations. The developed mathematical model makes it possible to determine the maximum transverse movements of the load and the maximum dynamic forces in the hoisting rope for any given law of carriage movement and rotation of the lifting mechanism drum and can be used to optimize the crane operation mode.*

Keywords: *mathematical model, cargo, crane, movable cart, vibrations.*

Сведения об авторах

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

В.Э. Кошелев
Телефон: +380 (71) 312-12-24
Эл. почта: vadim.koshelev1996@gmail.com

Статья поступила 08.12.2021 г.
© В.П. Кондрахин, В.Э. Кошелев, 2021
Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев





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

УДК 621.311

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

РАСЧЕТ ЗОН ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ МНОГОКРАТНЫМИ СТЕРЖНЕВЫМИ МОЛНИЕПРИЁМНИКАМИ

Представленное Web-приложение «Расчет молниезащиты многократными стержневыми молниеотводами» призвано упростить и оптимизировать расчѐт зон молниезащиты, образованной многократными молниеотводами, восполнить пробел между уже существующими сервисами, имеющими ограниченный функционал и специализированными коммерческими программами. Реализована возможность расчѐта разноразмерных зон защиты многократными стержневыми молниеприѐмниками, автопроверка защищенности объекта, деление защищаемого объекта на зоны для расчѐта защиты на выбранных уровнях, вычисление минимизированной высоты молниприѐмника в автоматическом режиме.

Ключевые слова: *молниезащита, стержневой молниеприѐмник, многократный молниеотвод, зона защиты, программное обеспечение.*

Постановка проблемы

С ростом глобального потепления усиливается грозовая активность, поэтому тематика молниезащиты становится всѐ более актуальной. Появление новых технологий, которым требуется защита от молний, стимулирует исследование проблемы молниезащиты намного шире, нежели это происходило раньше [1].

Полный комплекс мер молниезащиты наземных объектов подразумевает сочетание систем защиты внешней – от прямых ударов молнии и внутренней – устройства защиты от вторичных воздействий (наводок и импульсного перенапряжения). Внешняя молниезащита обеспечивает минимальный шанс прямого попадания молнии в сооружение, защищая тем самым его от повреждений. Она берѐт на себя удар молнии, который затем отводится в грунт.

Простота устройств, отсутствие необходимости в специальном техническом обслуживании и сравнительно надѐжная защита объекта от поражения ударами молнии, обеспечили молниеприѐмникам пассивной системы молниезащиты наиболее широкое распространение на практике [2].

Стержневые молниеотводы являются, как правило, основными элементами молниезащиты распределительных устройств электростанций и подстанций различных классов напряжений. Сам молниеотвод – это устройство, высота которого много больше высоты защищаемого объекта и через которое ток молнии отводится в землю, обходя защищаемый объект [3].

Объекты энергетики состоят как правило из крупных зданий или нескольких сооружений, занимающих значительную территорию, при проектировании молниезащиты которых невозможно обойтись без применения многократных молниеотводов, использование комбинаций которых, значительно увеличивают зону защиты.

Ручной расчѐт подобных объектов, требует большого количества времени и учѐта многих факторов при проектировании. По этой причине для решения таких задач с целью получения максимально быстрого, обоснованного, достоверного и сбалансированного результата, целесообразно использовать компьютерные технологии и специализированное программное обеспечение.

Использование специализированного программного обеспечения обязывает учитывать множество факторов, значительно усложняющих процесс проектирования:

– требовательность к наличию инженерных знаний и навыкам моделирования;

– для расчѐта молниезащиты программа требует наличие 3-х мерной модели объекта;

– софт представляют собой полноценные дистрибутивы требующие установки;

– ручной подбор оптимальной высоты молниприѐмника.

Немаловажным фактором является то, что подобное ПО имеет, как правило, коммерческий характер, что для рядового пользователя становится непреодолимым препятствием.

Помимо этого, существуют онлайн-сервисы, которые имеют ограниченный, примитивный функционал, который в целом сводится к элементарному расчѐту параметров по эмпирическим формулам, взятых из нормативных документов, и построению зон одиночных молниеотводов для одного прямоугольного равновысокого объекта.

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

Таким образом, каждое из существующих на сегодняшний день программных решений заставляет пользователя идти на компромисс. Ограниченный функционал либо профессиональное коммерческое решение.

Анализ последних исследований и публикаций

Современная молниезащита является весьма надежной, хотя и не может на 100% гарантировать сохранение оборудование после удара молнии. Но по статистике большая часть повреждений происходит из-за проблем с установкой и обслуживанием молниезащиты, а не из-за ее неэффективности.

Проблемы при проектировании молниезащиты сводятся к отсутствию полноценного универсального документа по организации системы молниезащиты.

На практике каждая из существующих методик имеет свой ряд неточностей, недочѐтов, которые не дают ответов на все нюансы проектировщику молниезащиты. Таким образом, единственным решением во избежание недочѐтов при проектировании и строительстве молниезащиты напрашивается унифицирование и объединение методик в одном более современном документе.

В настоящее же время с целью обеспечения единства требований при проектировании молниезащиты целесообразно изучить все имеющиеся документы.

Согласно СО 153–34.21.122-2003 [4] электростанции и подстанции относят к специальным объектам с ограниченной опасностью, минимально допустимый уровень надежности защиты от прямых ударов молнии (ПУМ) устанавливается в пределах 0,9 - 0,999 в зависимости от степени его общественной значимости и тяжести ожидаемых последствий от прямого удара молнии по согласованию с органами государственного контроля.

Важным аспектом является и определении наиболее выгодного исполнения элементов молниезащиты. Необходимо делать технико-экономическое обоснование, а также уделять внимание возможному ущербу на объектах от ударов молнии. Основываясь на приведѐнных фактах сравнения, наиболее предпочтительнее оказывается, как правило, расположение стержневых молниеотводов на самих конструкциях и присоединение их к общему заземляющему устройству всей подстанции, а применение отдельно стоящего молниеотвода с независимым контуром заземления рекомендуется применять в случаях, когда первый способ не в полной мере обеспечивает достаточную грозоупорность [5].

Таким образом экономический вопрос при выборе молниприѐмников включает в себя выбор оптимального количества, конструктивного исполнения и расположения молниприѐмников.

Обращение к рекомендуемым на сегодняшний день нормативным документам при проектировании молниезащиты, таким как СО-153-34-21.122-2003, не решает проблему. В разделе 3.3.1, можно лишь найти рекомендацию воспользоваться компьютерными программами, которые должны произвести точный расчѐт зон молниезащиты при использовании стержневого и тросового молниеприѐмника либо комбинации из нескольких таких устройств.

На сегодняшний день, пока нет ещѐ в непосредственной доступности столь удобных и точных компьютерных программ.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка Web-приложения, которое займѐт место между сервисами, имеющими ограниченный функционал и профессиональными коммерческими программами. Использование приложения позволит пользователю избавиться от компромисса и оптимизирует организацию молниезащиты при проектировании зон многократных молниприѐмников специальных объектов.

При разработке приложения решались следующие задачи:

– реализовать возможность расчѐта зоны защиты многократными стержневыми молниеприѐмниками;

– автопроверка защищенности объекта;

– реализовать возможность произвольного расположения стержневых молниприѐмников на плане;

– реализовать деление защищаемого объекта на зоны для расчѐта защиты на выбранных уровнях;

– вычисление минимизированной высоты молниприѐмника в автоматическом режиме.

Основной материал исследования

1. Описание программного комплекса.

Web-приложение может найти практическое применение среди пользователей, благодаря легкости применения и наличию отличительного функционала:

– построение зоны защиты многократными молниеотводами (количество 2, 4 или 6);

– отсутствие необходимости наличия 3-х мерной модели объекта;

– автоматическая проверка объекта на защищенность;

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

– получение минимизированной высоты молниприёмника;

– возможность разделить объект на зоны различной высоты;

Работа программы по расчѐту защитных зон стержневых молниеотводов, осуществляется по следующему алгоритму (рис. 1).

К исходным данным для вычислений параметров зоны защиты, требуемых к вводу, относятся (рис. 2):

– выбор требуемого уровня надѐжности от ПУМ (устанавливается по согласованию с органами государственного контроля в зависимости от степени его общественной значимости и тяжести ожидаемых последствий от прямого удара молнии):

Уровень надежности защиты от прямых ударов молнии: 0.9

– координаты молниеприѐмников;

– количество молниприѐмников (доступное количество молниеотводов, регулируется пользователем. Актуальным количеством для защиты ОРУ является использование четырѐх и более молниеотводов. Актуальность такого количества объясняется тем, что зона защиты четырѐх молниеотводов значительно превышает сумму зон защиты одиночных молниеотводов. Возможен выбор вариантов создания зоны из 2, 4 или 6 молниеприѐмников, в зависимости от исходной конфигурации защищаемого объекта):

– предварительная высота молниеотвода (определенные молниеотводы и их заданная высота призваны построить зону защиты на требуемой высоте. Правильный выбор высоты молниеотвода позволит минимизировать затраты на металл, при этом обеспечив достаточную зону защиты и надѐжность объекта от поражения молнией).

– координаты защищаемого объекта - рис. 3 (на основе введенных координат, определяется геометрия и выполняется построение защищаемого объекта. Приложение позволяет разделить объект на три размерные зоны, как особо характерных для ОРУ, что даст возможность визуально обозначить отдельные части защищаемого объекта):

– высота защищаемого объекта.

Параметр определяет высоту, каждой из размерных зон, что позволит получить зону защиты на желаемой заданной высоте.

Расчѐты выполняются в соответствии с «Инструкцией по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций» СО 153–34.21.122-2003.

К данным, на основе которых выполняется построение зоны защиты относятся (рис. 4): высота зоны $h0$; радиус зоны на уровне земли и высоте защищаемого объекта; рекомендуемая высота молниеотвода.

Перечень параметров является минимальным и достаточным для построения и определения геометрии зоны защиты.

Программа заканчивается сообщением о допущенных ошибках и комментариями к ним, а также даѐт заключение о защищенности объекта. Для ее осуществления применяются языки HTML5 и JavaScript. Для графических построений – элемент <canvas>.



Рис. 1. Алгоритм Web-приложения

Количество молниеотводов: 4

Молниеприемники	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
X (м):	3,5	3,5	31,25	31,25
Y (м):	26	6	6	26
Высота (м, <150):	11,5			

Рис. 2. Выбор количества и расположения молниеотводов

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

Количество зон защищаемых объектов: 3

Зоны	Зона 1	Зона 2	Зона 3
x1 (м):	0	3,5	31,25
x2 (м):	38,5	31,25	36,75
y1 (м):	0	5,5	5,5
y2 (м):	32	26,5	26,5
Высота здания hx (м):	2	5,5	5

Рис. 3. Определение геометрических параметров защищаемого объекта

Выходные данные

Расстояние между стержневыми молниеприемниками L (м):	34.2
Предельное расстояние между стержневыми молниеприемниками Lmax (м):	66.12
Высота зоны h0 (м):	9.77
Высота провеса hc (м):	8.34
Радиус зоны на уровне земли (м):	13.8
Радиус зоны rx1 на уровне высоты hx1 (м):	10.97
Радиус зоны rx2 на уровне высоты hx2 (м):	6.03
Радиус зоны rx3 на уровне высоты hx3 (м):	6.74
Рекомендуемая высота молниеотвода, не менее (м):	11.31

Применить

ЗДАНИЯ ЗАЩИЩЕНЫ

Рис. 4. Результаты расчѐта по Web-приложению

2. Проверка зоны защиты объекта

Автоматическая проверка защищенности зоны осуществляется на программном уровне. Для получения максимально точного результата о защищенности объекта после расстановки молниеотводов выбирается и рассчитывается каждая из зон в отдельности. Площадь каждой зоны подстанции делится на участки 10×10 и представляет собой сетку (рис. 5). Проверка всех ячеек сетки на предмет защищенности осуществляется от каждой пары молниеотводов. Сетка, ячейки которой находятся в зоне действия защиты хотя бы одной из пар молниеотводов, считается защищенной, а значит и оборудование, расположенное в этой зоне тоже защищено. Далее программа переходит к проверке следующей зоны на предмет защищенности. Если какая-либо ячейка сетки не попала в зону защиты, программа сообщает о незащищенности объекта, и предлагает в автоматическом режиме рекомендуемую высоту молниеотвода. Расчет высоты происходит путѐм еѐ наращивания в итерационном процессе, что позволяет получить минимизированную высоту молниеотвода.

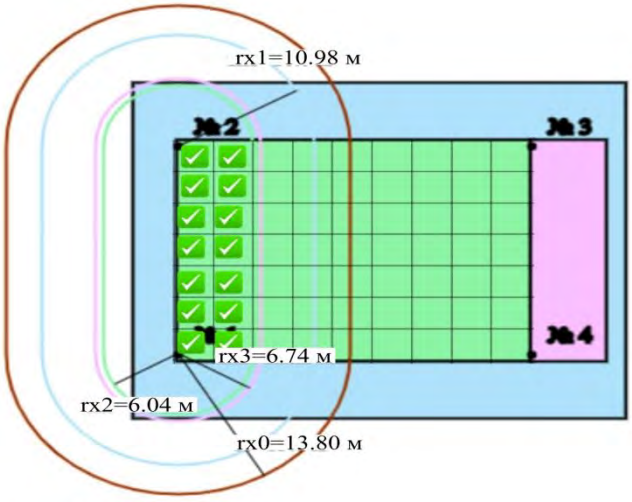


Рис. 5. Реализация автоматической проверки защищенности

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

Построение зоны защиты

Выберите пару молниеотводов, для которых рисовать защитную зону: 2 и 4 v

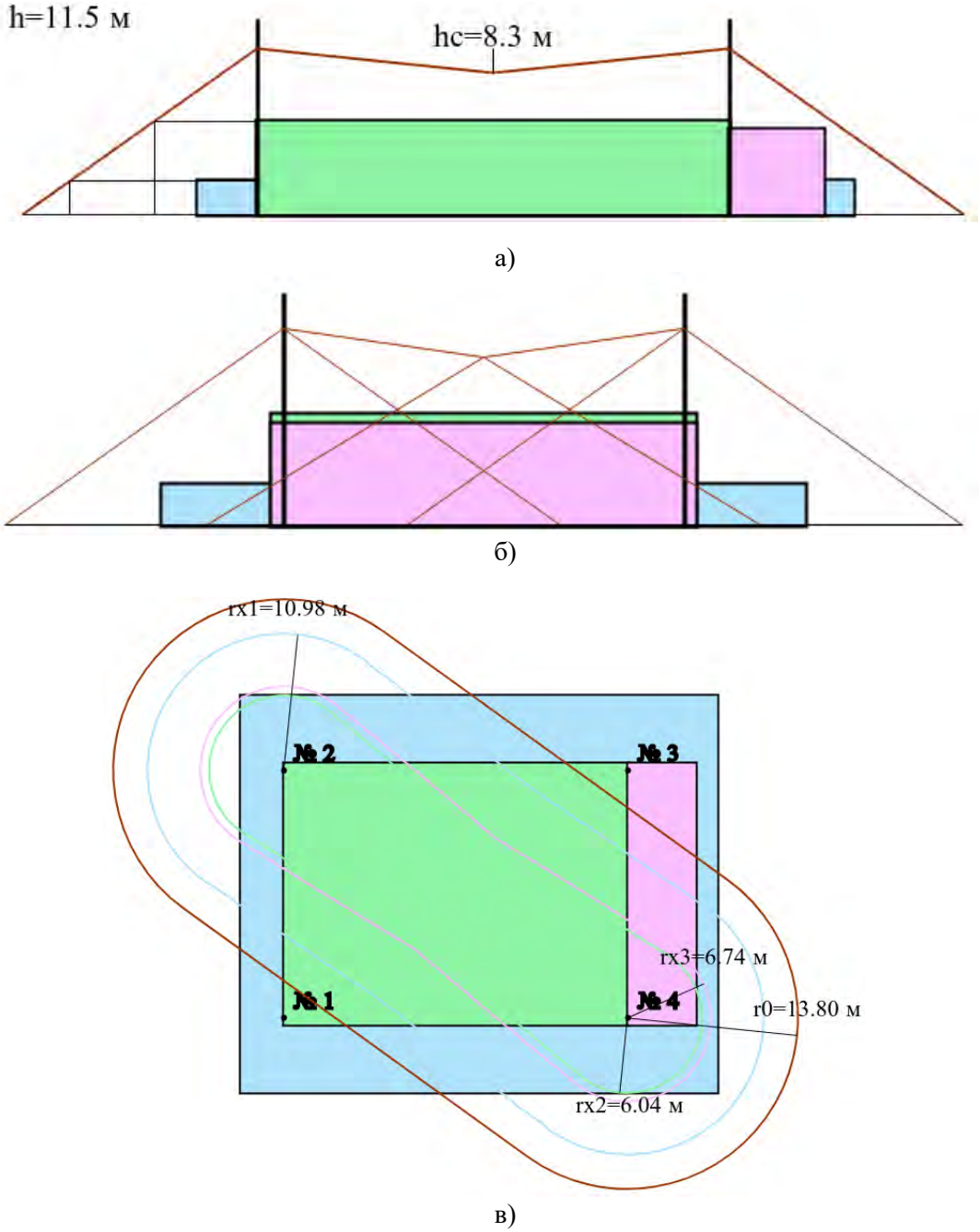


Рис. 6. Построение зоны защиты объекта:
а – вид спереди; *б* – вид сбоку; *в* – вид сверху

3. Построение геометрии защищаемого объекта и зоны защиты по вычисленным данным.

Приложение отображает три вида на защищаемый объект: вид спереди, вид сбоку и вид сверху. Каждая зона, определѐнная пользователем на начальном этапе, отображается соответствующим цветом. Функционал приложения позволяет пользователю самостоятельно выбрать пару молниеотводов, для возможности визуально изучить область защиты, обеспечивающую выбранными молниеотводами (рис. 6).

4. Расчёт более сложных конфигураций ОРУ

Web-приложение «Расчет зон молниезащиты многократными стержневыми молниеотводами» позволяет рассчитывать молниезащиту и более сложных ОРУ, конфигурация которых нестан-

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

дартна, защиту которых можно осуществить более чем 4-мя молниеприѐмниками.

Например, для защиты ОРУ-110/35 кВ зоны предлагается расположить следующим образом – рис. 7.

Алгоритм программы позволяет, в дальнейшем расширить функционал программы, и расширить построение зон защиты для 8-ми, 10-ти и большего количества молниприѐмников.

Чтобы убедиться в корректности работы приложения выполним расчет зон молниезащиты ОРУ с надѐжностью 0.9, построим зону защиты, определим количество и высоту молниеприѐмников.

Пример. ОРУ подстанции имеет следующие габаритные размеры: высота наиболее высокого объекта составляет hx=5,5 м, ширина b=32 м, длина a=38,5 м. Расстояние между ближними молниеотводами $l1$=20 м, между удалѐнными $l2$=27.75 м (рис. 8). Зона 1 определена шириной и длиной всего защищаемого объекта с высотой равной 2 м. Зоны 2 и 3 делят и визуально обозначают отдельные части защищаемого объекта и имеют высоту 5,5 м.

В результате расчета защиты ОРУ при выбранном расположении молниприѐмников требуется 4 молниеотвода высотой 11,31 м для обеспечения молниезащиты с надѐжностью 0,9 от прямого удара молнии (рис. 8).

Корректность работы приложения по примеру была проверена путѐм сравнения результатов, полученных при расчѐте другими доступными инструментами на различных уровнях надѐжности (табл. 1)

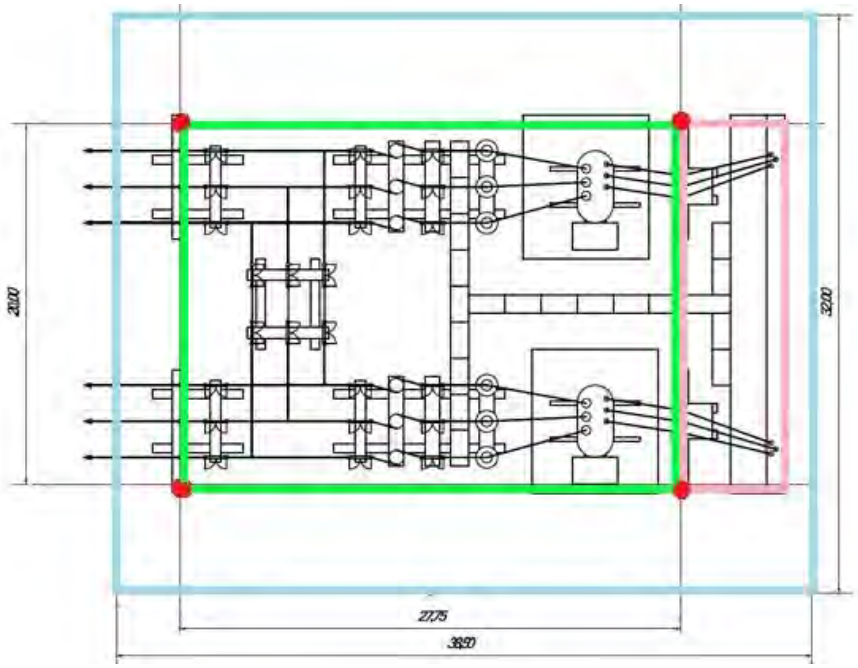


Рис. 8. Пример деления объекта на зоны

Табл. 1. Сравнение результатов, полученных при расчѐте различными инструментами

Высота молниеотвода	Программа расчѐта по методу СО	Надѐжность	Оценка защищенности
h=11,5 м h=14,3 м h=18,6 м	Ручной расчѐт	0,9 0,99 0,999	Объект защищен Объект защищен Объект защищен
h=11,5 м h=14,3 м h=18,6 м	Web-приложение	0,9 0,99 0,999	Объект защищен Объект защищен Объект защищен
h=11,5 м h=14,3 м h=18,6 м	Программа «ЗУМ» [6]	0,9 0,99 0,999	Объект защищен Объект защищен Объект защищен
h=11,5 м h=14,3 м h=18,6 м	Программа ZANDZ [7]	0,987 0,9986 0,99986	Объект защищен Объект защищен Объект защищен

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

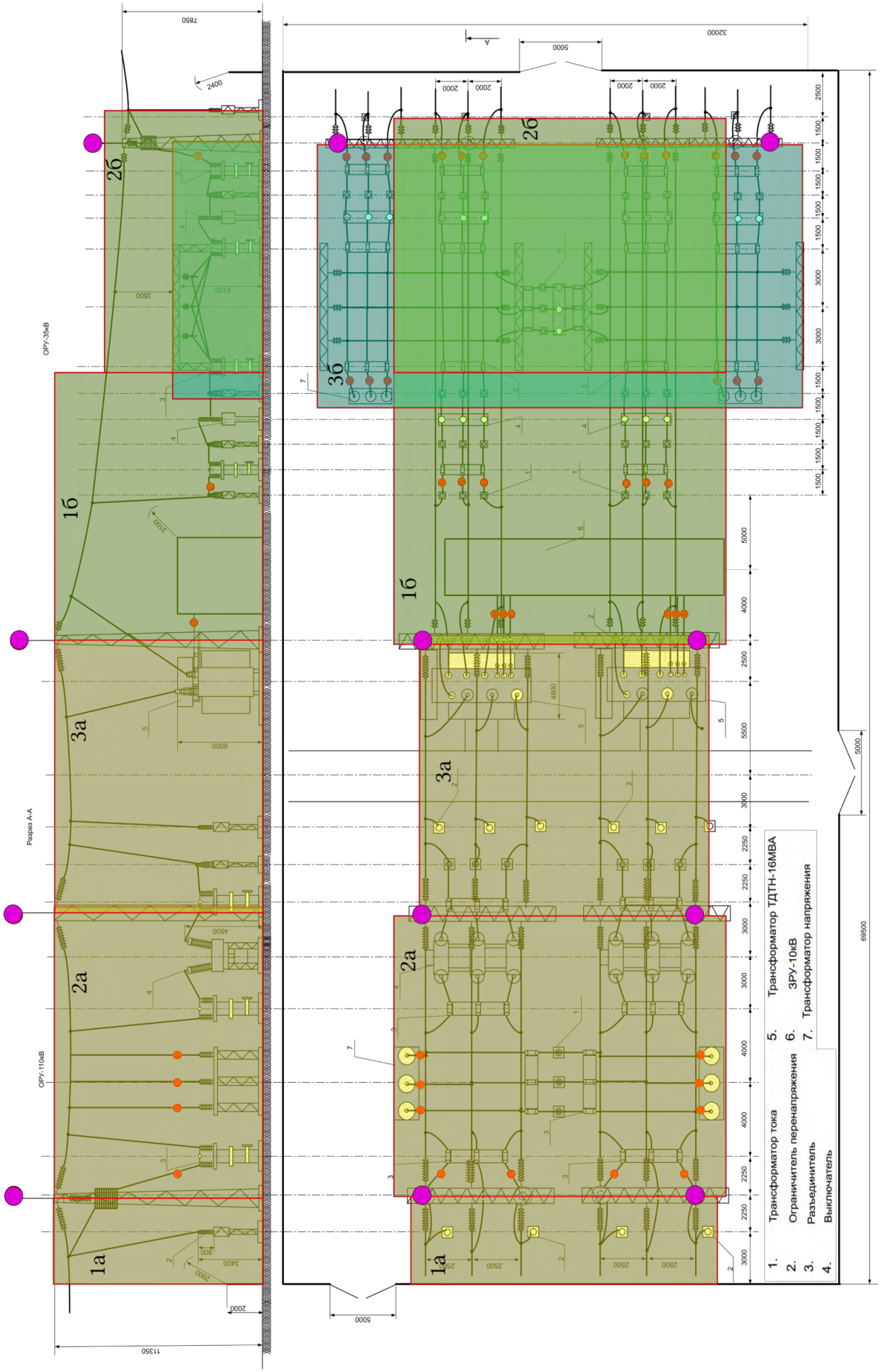


Рис. 7. Молниезащита сложных конфигураций ОРУ-110/35 кВ

Выводы

При проектировании молниезащиты объектов сложных конфигураций невозможно обойтись без применения многократных молниеотводов.

Ручной расчѐт сложных объектов требует большого количества времени и учѐта многих факторов при проектировании. По этой причине для решения таких задач с целью получения максимально быстрого, обоснованного, достоверного и сбалансированного результата целесообразно использовать компьютерные технологии и специализированное программное обеспечение.

Каждое из существующих на сегодняшний день программных решений заставляет пользователя идти на компромисс – ограниченный функционал либо профессиональное коммерческое решение.

Web-приложение «Расчет молниезащиты многократными стержневыми молниеотводами» выполнено с целью упростить и оптимизировать расчѐт молниезащиты образованной многократными молниеотводами. Корректность его работы была проверена путѐм сравнения результатов, полученных при расчѐте другими доступными инструментами.

В приложение реализован следующий отличительный функционал:

– построение зон защиты образованной многократными стержневыми молниеприѐмниками;

– возможность разделить объект на зоны различной высоты;

– подбор минимизированной высоты молниеприѐмника;

– проверка объекта на защищѐнность;

– отказ от использования 3-х мерной модели.

Список литературы

1. V российская конференция по молниезащите Новости электротехники Журнал 3(99) 2016 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2016/99/07.php
2. Типы молниеприѐмников: мачта, трос и сетка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://zandz.com/ru/biblioteka/tipy_molnieprie mnikov/
3. Исследование молниезащиты открытых распределительных устройств электрических станций и подстанций Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 61-66.
4. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций СО 153-34.21.122-2003. – Москва : Издательский дом ЭНЕРГИЯ, 2013. – 64 с. – ISBN 978-5-98908-103-5. – Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. – URL: https://www.iprbookshop.ru/22686.html (дата обращения: 08.02.2022).
5. Дьяков, А.Ф. [и др.]. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике / под ред. А. Ф. Дьякова. 2-е изд., испр. и доп. М.: Издат. дом МЭИ, 2011. – 544 с.
6. Программа «ЗУМ». Приложение к AutoCAD, предназначенное для комплексного расчета систем молниезащиты и заземления при проектировании объектов электроэнергетики. [Электронный ресурс]: URL: https://zym-emc.ru/zymprogram.html (дата обращения: 08.02.2022).
7. Сервис расчѐтов надѐжности системы молниезащиты и вероятности прорыва молнии в объект. [Электронный ресурс]: URL: https://calculations.zandz.com/ (дата обращения: 08.02.2022).

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

CALCULATION OF PROTECTION ZONES OF ELECTRIC POWER OBJECTS BY MULTIPLE LIGHTNING RODS

Background. *Energy facilities usually consist of large buildings or several structures occupying a significant area, in the design of lightning protection of which it is impossible to do without the use of multiple lightning rods, the use of combinations of which significantly increase the protection zone. Manual calculation of such objects requires a lot of time and takes into account many factors in the design. For this reason, in our time of computerization, in order to solve such problems, in order to obtain the fastest, most reasonable, reliable and balanced result, it is advisable to use computer technologies and specialized software.*

Materials and/or methods. *The use of specialized software obliges to take into account many factors that greatly complicate the design process, and besides, they are of a commercial nature.*

Existing online services have limited, primitive functionality, which comes down to elementary calculation of parameters and construction of zones of single lightning rods.

Thus, each of the currently existing software solutions forces the user to compromise. Limited func-

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

tionality or professional commercial solution.
Results. *The web-application "Calculation of lightning protection by multiple lightning rods" is designed to simplify and optimize the calculation of lightning protection formed by multiple lightning rods. The correctness of its work was verified by comparing the results obtained in the calculation of other available tools.*
Conclusion. *The developed Web application can find practical application among users. Due to its ease of use and the presence of distinctive functionality, it occupies a place between services that have limited functionality and professional commercial programs. Its use of the application will allow the user to get rid of the compromise and optimize the organization of lightning protection when designing zones of multiple lightning rods of special objects.*

Keywords: *lightning protection, rod lightning receiver, multiple lightning discharge, protection zone, software.*

Сведения об авторах
И.А. Бершадский
SPIN-код: 4772-3504
ORCID iD: 0000-0001-7383-3415
Телефон: +380 (71) 414-28-12
Эл. почта: ibersh164@gmail.com
И.И. Мазуров
Телефон: +380 (71) 469-70-03
Эл. почта: myspace@gmail.com
А.В. Згарбул
Телефон: +380 (71) 465-02-28
Эл. почта: zgarbul.andrey@gmail.com

Статья поступила 08.12.2021 г.
© И.А. Бершадский, А.В. Згарбул, И.И. Мазуров, 2021
Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев



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

УДК 621.316

И.Б. Гуляева /к.т.н./, М.К. Маренич
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
О.А. Демченко /к.т.н./, Л.А. Муфель /к.т.н./
ГУ «Макеевский государственный научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности» (Макеевка)

АДАПТАЦИЯ СХЕМЫ МАГНИТНОГО ПУСКАТЕЛЯ К РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ

Обоснованы технические решения, позволяющие расширить комплекс защитных функций шахтного магнитного пускателя путём адаптации его схемы к процессу выявления (с последующим защитным отключением) электрического контакта фазы сети с незаземлённым металлическим корпусом присоединённого электродвигателя, что создаёт возможность неприсоединения к заземлению центральной жилы отходящего гибкого кабеля и, тем самым, способствует подавлению электропоражающего фактора, определяемого ёмкостью изоляции сети относительно земли.

Ключевые слова: *шахтный магнитный пускатель, шахтный гибкий кабель, изоляция, проводимость,, электропоражающий фактор, цепь: «фаза сети – корпус двигателя», выявление, защитное отключение, схема, разработка, исследование.*

Постановка проблемы

Практика эксплуатации шахтных участковых электрических сетей свидетельствует о проявлении в них электропоражающего фактора, обусловленного ёмкостью изоляции относительно земли. Ёмкостная проводимость изоляции на землю обусловлена взаиморасположением силовых и центральной жил шахтного гибкого кабеля при подключении последней к цепи заземления, что позволяет сделать вывод о нерациональности подхода к самой компоновке системы электроснабжения участка шахты (когда заземление нестационарного электрооборудования осуществляют через центральные жилы кабелей – т.е., именно через те компоненты, которые и являются структурой ёмкости изоляции фаз сети относительно земли). Таким образом, реализуемая в настоящее время функция защиты человека от электропоражения в шахтной участковой электрической сети сводится к обесточиванию человека, по которому уже протекает ток электропоражающей величины, а не к изначальной минимизации этого тока. При этом, защита от электропоражения (защита от утечек тока на землю) воздействует централизовано на всю электрическую сеть участка шахты путём отключения автоматического выключателя участковой трансформаторной подстанции, что говорит об отсутствии селективности защитной функции. Имеющиеся сведения об альтернативных способах обустройства систем электроснабжения технологических участков позволяют ввести допущение о возможности достижения эффекта электробезопасности без обязательного заземления металлических корпусов силового электрооборудования, а наличие защитных и блокирующих функций в схемотехнике шахтных магнитных пускателей позволяет также ввести допущение о потенциальной возможности их дополнения функцией выявления повышенной проводимости изоляции силовых жил присоединённых гибких кабелей. Решение этой задачи позволило бы существенно снизить параметры электропоражающего фактора, переместить область распространения функции защиты от утечек тока на землю на уровень контроля отходящих присоединений магнитных пускателей, исключить необходимость заземления и изменить предназначение центральных жил шахтных гибких кабелей.

Анализ последних исследований и публикаций

Проводимость изоляции электрической сети участка шахты как фактор риска электротравматизма представлена в исследовании [1]. В результате рассмотрения проблемных вопросов и обоснования путей их решения установлено, что:

– существенное влияние на уровень электропоражающего фактора в шахтной участковой электрической сети оказывает ёмкость изоляции, образуемая между фазными жилами гибких кабелей и их центральными проводами при под-

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

ключении последних к цепи заземления. При этом ток в цепи заземления может достигать уровней, сопоставимых с величинами, предельно допустимыми по критерию искробезопасности;

– в условиях подключения центральных проводов шахтных гибких кабелей к заземлениям режим изолированной нейтрали трансформатора не является достаточным в контексте обеспечения электробезопасности эксплуатации шахтной участковой электрической сети;

– обособление центральных проводов гибких кабелей (исключение использования их в качестве заземляющих проводников) и использование их совместно с R-C-VD – цепями контроля в структуре магнитных пускателей является техническим решением, позволяющим выявить повреждение изоляции кабеля, отходящего от пускателя, реализовать селективный контроль состояния изоляции кабелей и селективность защитного отключения электропотребителей при существенном снижении импеданса изоляции силовых фазных проводов кабеля относительно земли;

– неиспользование центральных проводов гибких кабелей в качестве заземляющих позволит предотвратить появление электропоражающего фактора (либо существенно ограничить его уровень) в системе электроснабжения учпастка шахты; обусловленного импедансами изоляции между фазами сети и землёй;

– подключение R-C-VD – цепей контроля между «звездой» обмоток статора асинхронного двигателя электропотребителя и его корпусом позволяет эффективно выявить электрическое соединение фазы сети с корпусом этого двигателя, а также прикосновение человека к фазе сети и корпусу двигателя (сформировать команду на защитное отключение сети), что позволяет исключить необходимость заземелния двигателя через подключение к заземелнию центрального провода подводящего кабеля.

Селективность защитного отключения силовых присоединений шахтной участковой электрической сети в случае возникновения повышенной проводимости изоляции кабелей может быть осуществлена магнитными пускателями, которые осуществляют отключения силовых присоединений по факту появления в них ряда аварийных и опасных состояний [2,3]. В исследовании [1] обоснован принцип управления защитным отключением магнитного пускателя при появлении повышенной проводимости изоляции между силовыми жилами отходящего кабеля и его центральным проводом (центральной жилой). Практическую актуальность представляет решение задачи надёжного формирования команды на защитное отключение магнитного пускателя при появлении повышенной проводимости в цепи «фаза сети – корпус присоединённого электродвигателя». В этом случае, с учётом других защитных функций в схеме магнитного пускателя будет сосредоточен полный комплекс средств защитного отключения отходящего силового присоединения¸ а в электрической сети участка шахты будет реализован принцип селективного защитного отключения силовых присоединений. При этом будет существенно упрощён подход к реализации общесетевой защиты от утечек тока на землю при одновременном повышении безопасности эксплуатации шахтной участковой электрической сети.

Цели (задачи) исследования

Целью исследования является обоснование принципа адаптации схемы магнитного пускателя к реализации комплексной защиты отходящего силового присоединения, включающей функции выявления повышенной проводимости изоляции отходящего кабеля, в.т.ч., повышенной проводимости цепи «фаза электрической сети – корпус присоединённого электродвигаетля».

Основной материал исследования

Шахтный магнитный пускатель относится к силовым коммутационным аппаратам, предназначенным для дистанционного включения / отключения присоединённых асинхронных двигателей. Коммутационная способность его контактора согласуется с параметрами коммутируемых токов нагрузки, в т.ч., токов короткого замыкания [2,3], а быстродействие отключения находится в интервале времени отключения автоматических выключателей, что позволяет реализацию посредством магнитного пускателя функции защитного отключения силового присоединения.

Вывод о быстродействии коммутационной функции магнитного пускателя основан на анализе параметров применяемых контакторов, где превалируют вакуумные силовые коммутационные аппараты. Так, согласно [4,5], время отключения вакуумного однофазного контактора типа SPVC-630 составляет 0,005…0,009 с., а собственное время отключения трёхфазного контактора типа КВТ-1,14 составляет не более 0,14 с. При этом, время дребезга главных контактов каждого полюса контактора КВТ-1,14 при включении составляет не более 0,005 с., а разновременность замыкания главных контактов трёх полюсов при включении и размыкания главных контактов трёх полюсов при отключении не превышает 0,003 с. Для сравнения, согласно [2,6],

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

собственное время отключения автоматического выключателя серии А37ХХ в зависимости от типоразмера составляет 0,07…0,9 с. Следует отметить, что контакторы серии КВТ-1,14 являются одними из наиболее распространённых в структуре шахтных магнитных пускателей отечественного производства, что позволяет принять этот тип контактора в качестве базового для дальнейшего рассмотрения.

Предназначенные для эксплуатации в потенциально опасных условиях угольной шахты магнитные пускатели выполняют ряд защитных функций, обусловленных спецификой их функционирования в составе шахтных участковых электротехнических комплексов:

– автоматическое отключение отходящего присоединения при возникновении в нём междуфазного короткого замыкания;

– температурная защита присоединённого асинхронного двигателя, работающего с перегрузкой, в т.ч., защитное отключение двигателя в случае его несостоявшегося пуска;

– контроль сопротивления изоляции отключенного силового присоединения и блокировка включения контактора пускателя при недопустимо низком сопротивлении изоляции кабеля.

Кроме этого, схема дистанционного управления контактором также позволяет осуществить ряд защитных функций:

– нулевая защита (отключение контактора при исчезновении напряжения в сети и невозможность последующего самопроизвольного включения контактора);

– защита от потери управляемости при повреждении цепи подключения кнопочного поста.

Следствием развития схемотехники рудничной силовой коммутационной аппаратуры стало дополнение защитных функций магнитного пускателя:

– предварительным контролем состояния изоляции, защитой от утечек тока на землю и от токов короткого замыкания в отходящих присоединениях сигнальных проводников – цепей напряжением 36 В и 42 В [7];

– контролем цепей заземления передвижных машин при питании их напряжением 1140 В [8].

Это свидетельствует о тенденции реализации на базе магнитного пускателя полного комплекса защитных функций. В то же время, схемотехника контроля цепей заземления передвижных машин, реализованная блоком БКЗ, в соответствии с [8]:

– существенно усложняет схему магнитного пускателя, снижая её надёжность (применение мостовой схемы контроля сопротивления изоляции, параметры которой существенно зависят от величин сопротивлений плеч измерительного моста и характеристик полупроводникового усилителя);

– полностью теряет свою практическую актуальность при условии применения альтернативного подхода к формированию структуры системы электроснаюжения технологического участка шахты, где, в соответствии с [1], т.е. при условии применения средств контроля проводимости цепей «фаза электрической сети – корпус электроустановки», не предусматривается заземление металлических корпусов электрооборудования, в т.ч., корпусов передвижных машин.

В то же время, реализация на базе магнитного пускателя функции контроля (с целью защитного отключения электропотребителя) величины проводимости изоляции отходящего силового присоединения, включая цепь «фаза электрической сети – корпус электродвигателя»:

– представляет собой завершающее звено в структуре комплекса защит от аварийных и опасных состояний силового присоединения, отходящего от магнитного пускателя;

– позволяет отказаться от функции централизованной защиты электросети участка шахты от утечек тока на землю и, соответственно, от применения соответствующей аппаратуры в составе распределительного устройства низкого напряжения участковой трансформаторной подстанции (упростив, тем самым, схемотехнику защиты и повысив её надёжность);

– позволяет обеспечить селективность защитного отключения силовых присоединений с повышенной проводимостью изоляции;

– позволяет повысить безопасность эксплуатации электрической сети участка шахты вследствие исключения необходимости заземления центральных жил (проводов) гибких кабелей (определяющих появление ёмкостных проводимостей между фазами сети и землёй).

Как следует из [1], применение R-C-VD – измерительной цепи в структуре асинхронного двигателя (при подключении её между «звездой» обмоток статора и металлическим корпусом двигателя) позволяет выявить эффект касания фазой проводника сети металлического корпуса электродвигателя. Учитывая наличие в структуре кабеля (подводящего электропитание к двигателю) центральной жилы, при условии неподключения её к заземляющей сети, может быть реализован эффект подачи со стороны асинхронного двигателя в схему магнитного пускателя команды на защитное отключение по цепи, в структуру которой входит центральная жила гибкого кабеля.

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

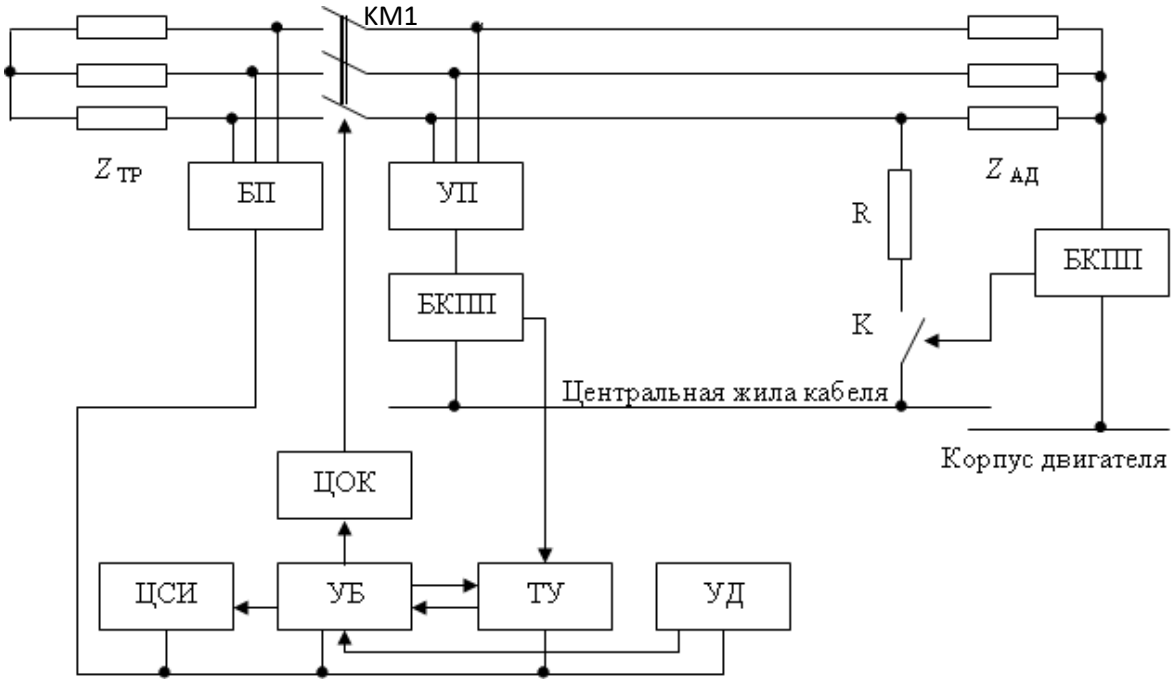


Рис. 1. Блок-схема устройства защитного отключения магнитного пускателя при возникновении повышенной проводимости изоляции отходящего кабеля, включая проводимость цепи «фаза – корпус двигателя» силового присоединения:
БКПП – блок контроля параметров проводимости; *БП* – блок питания магнитного пускателя; *УП* – узел присоединения к фазам сети на выходе магнитного пускателя; *ЦОК* – цепь отключения контактора магнитного пускателя; *КМ1* – силовые контакты магнитного пускателя; *УБ* – узел блокировки; *ТУ* – триггерный узел; *УД* – узел деблокировки; *ЦСИ* – цепь световой индикации; $Z_{ТР}$; $Z_{АД}$ – импедансы вторичной обмотки трансформатора участковой подстанции и статора асинхронного двигателя силового присоединения, соответственно

Это положение иллюстрируется рис. 1, где измерительная R-C-VD – цепь представлена блоком контроля параметров проводимости (БКПП), в ктором исполнительное реле в случае выявления повышенной проводимости между фазами сети и корпусом двигателя своим контактом К искусственно создаёт повышенную проводимость через сопротивление резистора R с фазы сети на обособленную центральную жилу кабеля. При наличии в структуре магнитного пускателя аналогичной R-C-VD – измерительной цепи (блок БКПП, присоединённый к сети на выходе магнитного пускателя через узел УП) это приведёт к непосредственному отключающему воздействию на контактор магнитного пускателя.

Сопутствующими функциями в этом случае должны выступать:

– фиксация команды на защитное отключение контактора магнитного пускателя (отрабатывается триггерным узлом);

– блокирование отключенного состояния контактора магнитного пускателя;

– световая индикация причины защитного отключения магнитного пускателя;

– функция деблокировки отключенного состояния контактора пускателя.

Принципиальная схема устройства, реализующего данный способ, представлена на рис. 2, где элементами ИЛИ-НЕ (D1-D2) реализуется функция триггера – запоминания импульсной команды на отключение контактора КМ1, формируемой замыканием контакта К1.1 реле К1, а элементами И-НЕ (D3 – D4) реализуется функция деблокировки (кнопка «Деблок.») команды на удержание контактора КМ1 пускателя в отключенном состоянии.

Исполнительным элементом защиты выступает реле К3, находящееся в нормально включенном состоянии, что позволяет осуществлять самоконтроль исправности функциональных узлов звщиты. Световую индикацию защитной функции выполняет цепь светодиода VD3.

Как следует из схем (рис. 1, рис. 2), дооснащение структуры магнитного пускателя R-C-VD – измерительной цепью, подключеннной между фазами сети (узел УП) и обособленной центральной жилой отходящего кабеля, позволяет, помимо отработки защитной функции при появлении контакта фазы сети с корпусом электро-

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

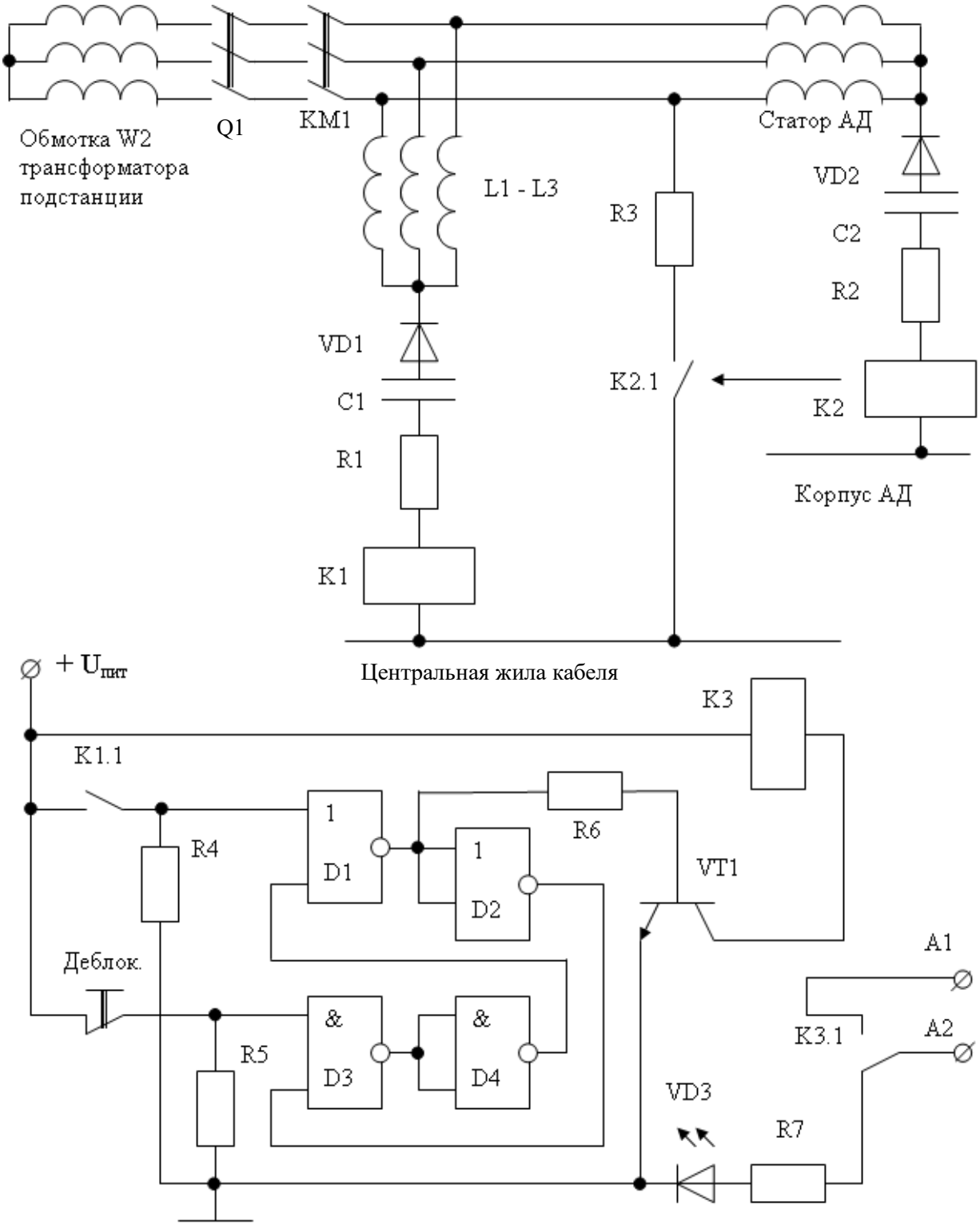


Рис. 2. Схема устройства защитного отключения магнитного пускателя при появлении повышенной проводимости изоляции в кабеле силового присоединения, а также в цепи: «фаза – корпус присоединённого электродвигателя»:
контакт К3.1 выводами «А1» – «А2» последовательно присоединён в цепь дистанционного управления контактором КМ1 магнитного пускателя; Q1 – обобщённая структура силовых коммутационных устройств в последовательной трёхфазной цепи перед контактором КМ1

двигателя, выявлять состояние повышенной проводимости изоляции этого кабеля (проводимость между фазами кабеля и его обособленной центральной жилой). В этом случае также будет иметь место реакция блока БКПП в структуре магнитного пускателя.

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

Такой подход согласуется с состоянием заземления металлических корпусов силовой коммутационной аппаратуры (магнитных пускателей, станций управления и т.п.). В то же время, развитием данного подхода может быть реализация функции выявления контакта фазы сети с металлическим корпусом силового коммутационного электрического аппарата (магнитного пускателя и т.п.). Это поясняется схемой (рис. 3), где предусмотрен дополнительный блок БКПП между фазами сети (присоединён через узел УП) и металлическим корпусом пускателя. Совместно с цепью R1-K1 он выполняет ту же функцию, что и блок БКПП с цепью R2-K2 в структуре асинхронного двигателя электропотребителя.

В этом случае защитное отключение пускателя не приведёт к устранению опасного состояния объекта, если контакт фазы сети с его металлическим корпусом имел место со стороны ввода к контактору.

В то же время, защитная функция будет реализована в полном объёме в случае контакта фазы сети с корпусом пускателя в цепи, отходящей от его контактора, что в целом, повышает уровень электробезопасности эксплуатации шахтного участкового электротехнического комплекса.

Таким образом, применение (в соответствии с рис. 1 … рис. 3) технических средств контроля и защиты позволяет:

– отказаться от требований обязательного заземления металлических корпусов электродвигателей, другого нестационарного электрооборудования, входящего в структуру электротехнического комплекса участка шахты;

– кардинально изменить подход к использованию центральных жил гибких кабелей на основе недопущения их подключения к заземляющей сети участка шахты, что позволит исключить создание повышенных ёмкостных проводимостей в цепях «фаза – земля» и, следовательно, опасности возникновения электропоржающего уроня тока при касании человека к фазе сети;

– скорректировать функции участкового аппарата защиты от утечек тока на землю, ограничив его область применеия исключительно контролем состояния изоляции магистрального кабеля, отходящего от участковой трансформаторной подстанции.

При неподключении центральных жил гибких кабелей к заземляющей сети и существенном снижении, в связи с этим, ёмкостных проводимостей в цепях «фаза электрической сети – земля» логичным представляется допущение применительно к участковому аппарату защиты от утечек тока на землю о необязательности компенсации ёмкости изоляции сети, выявления и шунтирования на землю (через цепь малого сопротивления) повреждённой фазы. Это существенно упрощает схему данного аппарата, а при условии применения в качестве магистральных – кабелей с обособленной центральной жилой делает возможным применить структуру R-C-VD – измерительной цепи (включающую исполнительное реле, в соответствии с рис. 2) в качестве устройства контроля состояния изоляции присоединений магистрального кабеля. В этом случае воздействие исполнительного реле R-C-VD – измерительной цепи будет распространяться на автоматический выключатель участковой трансформаторной подстанции, а контрольная функция будет возможна и в отношении возникновения контакта фазы с корпусом магнитного пускателя, станции управления и т.п., что сделает необязательным заземление их металлических корпусов.

При условии обособления (неприсоединения к заземлениям) центральной жилы отходящего от пускателя гибкого кабеля (охваченного по всей длине проводящими экранами изоляции силовых жил) касание человеком фазного проводника электрической сети, нормально находящегося под напряжением, не сопровождается возникновением электропоражающего фактора и:

– не вызовет защитное отключение электрической сети при условии наличия высоких сопротивлений между металлическими корпусами электрооборудования и землёй;

– вызовет защитное отключение электрической сети при условии наличия малых величин сопротивлений между металлическими корпусами электрооборудования и землёй (что имеет высокую степень вероятности);

– вызовет защитное отключение электрической сети в случае прикосновения человека к металлическому корпусу электрооборудования.

При этом, в процессе формирования информационного сигнала соответствующим блоком БКПП (в структуре магнитного пускателя, либо в структуре асинхронного двигателя электропотребителя, по рис. 3) через цепь «фаза сети – тело человека – корпус электроустановки» будут протекать импульсы тока $i_{УТ}$ в течение интервала времени Δt защитного отключения силового коммутационного аппарата (введём допущение: Δt=0,14 с. для контактора КВТ-1.14), что иллюстрируется результатами компьютерного моделирования (рис. 4).

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

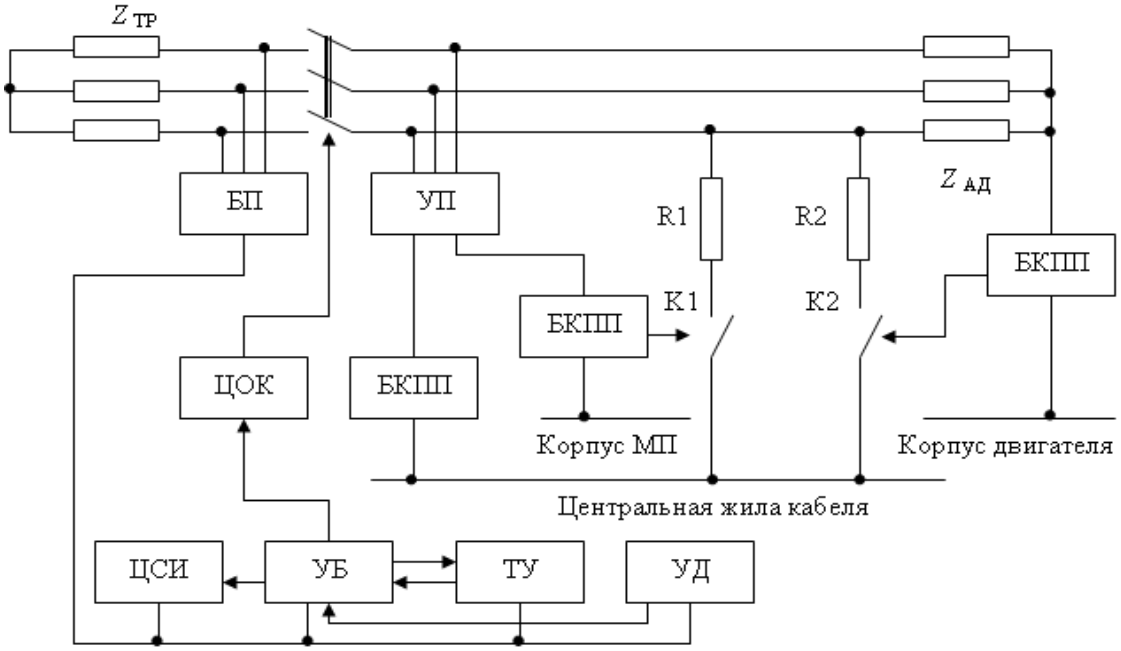


Рис. 3. Блок-схема устройства защиты при возникновении повышенной проводимости изоляции отходящего кабеля, реализующая выявление контакта фазы сети с корпусом электродвигателя потребителя и дополнительно – выявление контакта фазы сети корпусом магнитного пускателя (МП)

При моделировании приняты следующие допущения:

– ёмкость конденсатора блока БКПП (по рис. 2) составляет: C=200 мкФ;

– сопротивление резистора блока БКПП (по рис. 2) составляет R=1 кОм;

– сопротивление тела человека (при его касании одновременно к фазе сети и корпусу электрооборудования составляет $R_{УТ}$=1 кОм;

– активное сопротивление и индуктивность фазы статора рудничного асинхронного двигателя высокой мощности (200 кВт и выше) имеют порядок, соответственно, R_s≈0,06…0,08 Ом; L_s≈0,0003…0,0005 Гн, что является несущественным в отношении ограничения тока в цепи «фаза сети – тело человека – корпус электродвигателя – измерительныя цепь БКПП – «звезда» обмоток статора двигателя». При моделировании принимаем: R_s=0,090811 Ом и L_s=0,00032833 Гн, что соответствует параметрам двигателя типа 2ЭКВ4УС2 мощностью 220 кВт [9];

– в качестве электроэнергетического источника принимаем участковую трансформаторную подстанцию КТПВ-1250/6 с параметрами: при линейном напряжении выхода 660 В, активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки равны, соответственно, R_{mp}=0,0025 Ом; L_{mp}=0,0000665 Гн; при линейном напряжении выхода 1140 В, активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки равны, соответственно R_{mp}=0,0076 Ом; L_{mp}=0,000219 Гн.

Как следует из результатов моделирования, на интервале времени Δt амплитуды импульсов тока $i_{УТ}$ снижаются (в сети напряжения 660 В – от 139 мА до 124 мА; в сети напряжения 1140 В – от 225 мА до 214 мА), что определяется процессом заряда конденгсатора С в блоке БКПП. Учитывая синусоидельность импульсов тока $i_{УТ}$ и величины расчётных значений его амплитуд, могут быть вычислены действующие значения этого тока для каждого интервала импульса (от t_H до t_K), где ΔT – интервал времени, включающий продолжительность импульса тока и продолжительность последующей бестоковой паузы:

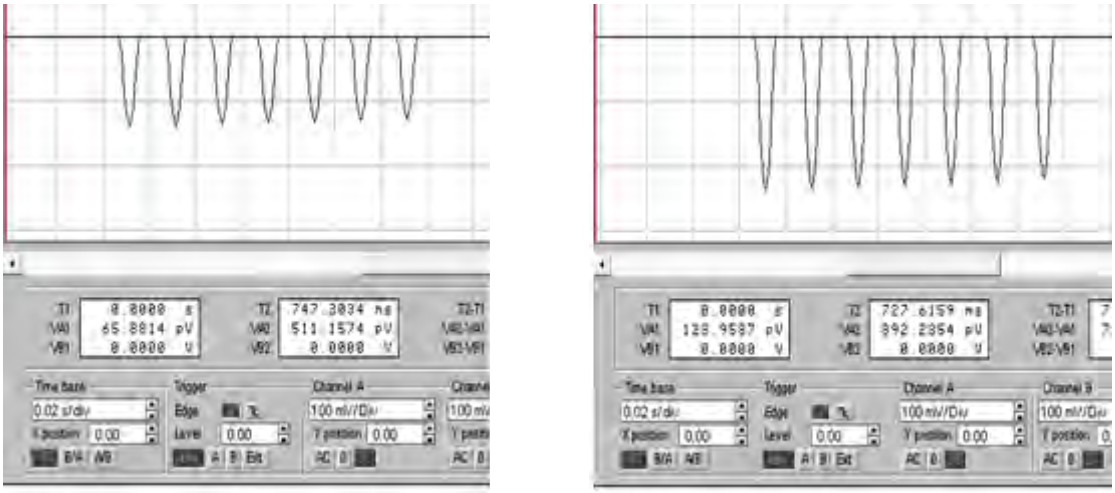
$$I_{УТ} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T}\int_{t_н}^{t_к} {i_{УТ}}^2 dt}\,. \qquad (1)$$

Результатом вычислений является определение количества электричества через тело человека на интервале времени осуществления защитного отключения электрической сети контактором магнитного пускателя:

$$q = \sum_{t=0}^{t=0,14c} I_{УТi}\Delta Ti\,, \qquad (2)$$

где ΔT_i – продолжительность импульса тока $i_{УТ}$ и следующей за ним паузы на i-м интервале измерения.

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



а б

Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока (мА) в цепи «фаза сети – тело человека – корпус электродвигателя – «звезда» обмоток статора электродвигателя при линейном напряжении сети 660 В (а) и 1140 В (б) на временно́м интервале защитного отключения контактора магнитного пускателя – представлены в результате моделирования как напряжения, снятые на резисторе сопротивления 1 Ом. Цена деления шкалы осциллографа – 100 мВ/деление

В данном случае в течение Δt=0,14 с. параметры количества электричества q через тело человека составляют: для сети линейного напряжения 660 В 12,55 мА·с; для сети линейного напряжения 1140 В – 21,72 мА·с, что существенно меньше в сопоставлении с предельно допустимыми параметрами q, нормируемыми по [10] ($q_{доп.}$=50 мА·с).

Величина тока $i_{УТ}$ соответствует (по критерию достаточности) параметрам срабатывания значительной номенклатуры исполнительных электромагнитных реле (как исполнительных элементов блока БКПП). Этот ток может быть ещё более понижен увеличением сопротивления резистора R данного блока. Однако и при R=1 кОм работоспособность средства защиты при $q<q_{доп.}$ поддерживается.

При условии применения данных схемных решений, обязательного изолирования от заземления центральных жил шахтных гибких кабелей, использующихся в структуре электротехнического комплекса участка шахты, дополнительным средством в области повышения электробезопасности эксплуатации силового рудничного электрооборудования следует считать наложение изоляционных покрытий на внутренние поверхности отсеков кабельных вводов силовых коммутационных аппаратов и асинхронных двигателей.

Выводы

Исследованием доказана возможность расширения комплекса защитных функций шахтного магнитного пускателя вследствие адаптации его схемы к процессу выявления (с последующим защитным отключением) электрического контакта фазы сети с незаземлённым металлическим корпусом присоединённого электродвигателя (присоединённой электроустановки). Предложенные схемные решения предусматривают неподключение центральной жилы отходящего от пускателя гибкого кабеля к заземлениям и использование её в качестве проводника для передачи в схему магнитного пускателя информационного сигнала как о снижении сопротивления изоляции фазных проводников кабеля, так и о наличии высокой проводимости между фазой электрической сети и металлическим корпусом присоединённого электродвигателя (присоединённой электроустановки).

Предложенные технические решения позволяют выявлять (с последующим защитным отключением электрической сети) факт касания человеком фазы сети и незаземлённого металлического корпуса элепктродвигателя, присоединённого к магнитному пускателю. При этом параметр количества электричества через тело человека поддерживается на безопасном уровне.

Список литературы

1. Проводимость изоляции электрической сети участка шахты как фактор риска электротравматизма. Проблемные вопросы и пути их решения / И.Б. Гуляева, Е.С. Дубинка, М.К. Маренич, Л.А. Муфель, О.А. Демченко // Вестник Донецкого технического университета. – Донецк, ГОУВПО «ДОННТУ», 2021. – Вып. 3(25). – С. 34-47.

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

2. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. / [Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Ванеев Б.Н., Гостищев В.М.]; под ред. Б.Н. Ванеева. – [2-е изд., перераб. И доп.]. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2001. – Т.1.: (Гл.1-21). – 477 с.; Т.2.: (Гл.22-44). – 440 с.
3. Пускатели взрывозащищённые искробезопасные ПВИТ-630МВ, ПВИТ-515МВ, ПВИТ-400МВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.exdi.ru/file_str/423.pdf. – Загл. с экрана.
4. Контактор однофазный вакуумный серии SPVC. Техническое описание: Контактор серии SPVC, завод «Таврида», Севастополь: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.masters.donntu.org/2008/fema/tarasenko/library/5.htm . – Загл. с экрана
5. Контакторы вакуумные типа КВТ-1,14. Руководство по эксплуатации КУ-ЮЖ.644536.001. РЭ. – 34 с. – Режим доступа: https://xn----7sbbf0bfcbnkdld2a0acga8m.xn--p1ai/uploads/files/Rukovodstvo%20KVT-1,14.pdf .– Загл. с экрана.
6. Выключатели автоматические А3790. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ОБЕ.140.010.ТО. – Режим доступа: http://www.pec.by/content/files_a3790u/a3790_to_ie.pdf. – Загл. с экрана.
7. Пускатель взрывозащищённый искробезопасный ПВИТ-М: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sinref.ru/000_uchebniki/01791shahtnoe_oborudov/051_puskatel_pvit_m/015.htm. – Загл. с экрана
8. Блоки БКЗ контроля цепей заземления передвижных машин при питании их напряжением 1140 В: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/novoe-vzryvozaschischennoe-elektrooborudovanie-18.html – Загл. с экрана
9. Каика В.В. Взрывозащищённые асинхронные двигатели: выбор, эксплуатация и ремонт / В.В. Каика, Т.В. Швецова, А.И. Аниканов и др.; под. общ. Ред. В.В. Каики. – Донецк: Юго-Восток, 2010. – 360 с.
10. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. С изменениями согласно ИУС 11-80, 7-81, 11-83. Соответствует СТ СЭВ 2309-80. – [Вступил в силу 01.01.79]. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 13 с. – (Межгосударственный стандарт).

I.B. Guliaeva /Cand. Sci. (Eng.)/, M.K. Marenich
Donetsk National Technical University (Donetsk)
O.A. Demchenko /Cand. Sci. (Eng.)/ L.A. Mufel /Cand. Sci. (Eng.)/.
State Makeevka Safety in Mines Research Institute (Makeevka)

ADAPTATION OF THE MAGNETIC STARTER CIRCUIT TO THE IMPLEMENTATION OF INTEGRATED PROTECTION OF THE POWER CONNECTION

Background. *Previous studies have established the possibility of monitoring the phase short circuit to the motor housing in the structure of the electrical complex of the mine section without necessarily connecting the motor frame to ground via the center wire of the flexible cable. The isolation of this central wire makes it possible to largely suppress the parameters of the electrodamaging factor. The substantiation of the structure and development of a circuit for controlling the protective shutdown of a magnetic starter, which reacts to the appearance of increased conductivity between the phase of the electrical network and the metal case of the connected electric motor, is of scientific and practical relevance.*

Materials and/or methods. *Based on the conceptual provisions of the general theory of electrical engineering, taking into account the specifics of building a power supply system for a mine site, the structure was substantiated and a circuit was developed for controlling the protective shutdown of the starter, which reacts to the appearance of increased conductivity between the network phase and the housing of the connected electric motor. The computer simulation method was used to analyze the protective functions of the device in relation to the variant of the response to a person touching the network phase and the ungrounded body of the electric motor.*

Results. *The study proved the possibility of expanding the complex of protective functions of a mine magnetic starter by adapting its circuit to the process of detecting (with subsequent protective disconnection) the electrical contact of the network phase with the ungrounded metal housing of the connected electric motor (connected electrical installation). The proposed circuit solutions provide for the non-connection of the central core of the flexible cable extending from the starter to the earths and*

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

its use as a conductor for transmitting an information signal to the magnetic starter circuit both about a decrease in the insulation resistance of the phase conductors of the cable, and about the presence of high conductivity between the phase of the electrical network and the metal housing when an electric motor (connected electrical installation) is connected.
The proposed technical solutions make it possible to detect (with subsequent protective disconnection of the electrical network) the fact that a person touches the phase of the network and the ungrounded metal housing of the electric motor connected to the magnetic starter. At the same time, the parameter of the amount of electricity through the human body is maintained at a safe level.
Conclusion. *The technical solutions allowing to expand the complex of protective functions of the mine magnetic starter by adapting its circuit to the process of detecting (followed by protective disconnection) the electrical contact of the network phase with the ungrounded metal housing of the connected electric motor are substantiated, which creates the possibility of non-alignment to the grounding of the central core of the outgoing flexible cable and, thereby, contributes to the suppression of the electric disturbing factor determined by the insulation capacity of the network relative to the ground.*

Keywords: *mine magnetic starter, mine flexible cable, insulation, conductivity, electric disturbing factor, circuit: "network phase - motor housing", detection, protective shutdown, circuit, development, research.*

Сведения об авторах

И.Б. Гуляева
SPIN-код: 7065-0724
ORCID iD: 0000-0001-8215-4297
Researcher ID: 3503273
Телефон: +380 (71) 332-75-75
Эл. почта: iraguliaeva@gmail.com

О.А. Демченко
Телефон: +380 (71) 373-92-58
Эл. почта: maknii.ra@gmail.com

М.К. Маренич
Телефон: +380 (71) 328-05-79
Эл. почта: marenichmk@gmail.com

Л.А. Муфель
Телефон: +380 (71) 475-08-99
Эл. почта: maknii.ra@gmail.com

Статья поступила 17.12.2021 г.
© И.Б. Гуляева, О.А. Демченко М.К. Маренич, Л.А. Муфель, 2021
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Ковалёв



УДК 54.01

А.Н. Мартыненко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА ДВУХЭЛЕМЕНТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Работа основана на теории множеств. Химические элементы и двухэлементные вещества рассматриваются как генетически связанные множества в рамках таблицы Д.И. Менделеева. При систематизации множества двухэлементных веществ обнаружена периодичность свойств подмножеств, представляющих собой набор бинарных соединений с определенным элементом. Под свойствами подмножеств понимаются статистические данные. Предложены дальнейшие шаги по расширению метода систематизации химического пространства.

Ключевые слова: *химическое пространство, множество, система, периодичность.*

Постановка проблемы

На сегодняшний день предпринималось много попыток систематизировать химическое пространство, это обуславливается стремлением к разработке более совершенных способов предсказания новых веществ и к открытию универсальных закономерностей развития материи. В общем, под систематизацией набора химических веществ понимается организация их в систему путѐм выявления структурированных связей между ними. В базах данных зарегистрировано 174 млн. химических веществ, в их число входят органические и неорганические химические вещества, а также 68 млн. цепочек белков и ДНК [1]. Выявление связей в таком колоссальном множестве является не простой задачей, т.к. установлено, что при рассмотрении дискретной системы количество отраженной информации о ней возрастает в логарифмической зависимости с ростом количества еѐ элементов [2]. Но, с другой стороны, известно, для того чтобы выделить систему, необходимо определить системообразующий фактор, который объясняет сущность сил, объединяющих множество в единое.

Анализ последних исследований и публикаций

В химическом пространстве есть выделенные группы веществ, которые внутри множества не структурированы. Например, в справочнике диаграмм двойных сплавов металлов [3] используется упорядочивание на основе английского алфавита, этот способ не несет научного смысла, и применяется для удобства анализа информации. Частично оформленную систему можно наблюдать в множестве силикатов, при их систематизации используется кристаллическая структура (островные, цепочные, каркасные и т.д.).

Составляет большой интерес подход, применяемый в работе [4], где впервые, в таком роде, составлены систематические таблицы взаимодействия металлов с другими элементами. В таблицах представлены лаконичные данные о взаимной растворимости компонентов, образовании металлидов или отсутствии взаимодействия в двойных системах на основе металлов (рис. 1). Подобное рассмотрение возможных взаимодействий металлов, как отдельных множеств, исследовались в более поздних работах: бария [5], свинца [6], европия и иттербия [7], бериллия [8].

Что касается современных работ, то они преимущественно связаны с хемоинформатическим анализом, при котором химическое пространство визуализируется в 2D и 3D пространстве. Например, для поиска фармацевтических веществ нашли широкое применение нейросетевые алгоритмы [9,10], для нахождения веществ «рекордсменов» применяют эволюционные алгоритмы с использованием молекулярных квантовых чисел [11].

Рассмотренные работы узкой направленности, не несут в себе системных подходов и не поднимают общих вопросов о закономерностях, которые лежат в формировании границ и связей между частями химического пространства. Если же речь идет о сведении химического пространства в единую систему, то очевидным системообразующим фактором должно выступать положение о зависимости свойств веществ от их атомно-молекулярного строения. Весомым доводом о высокой эффективности использования модели атома, при решении рассматриваемой задачи, выступает периодическая система элементов (ПСЭ), отображающая связь свойств одноэлементных веществ со строением электронных оболочек.

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

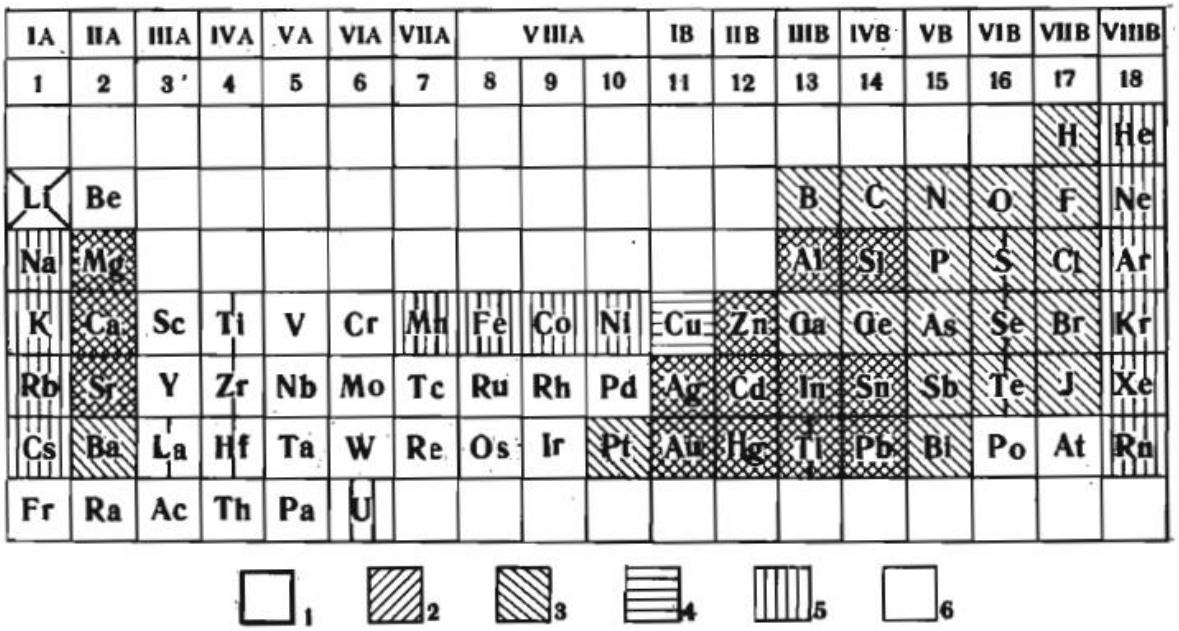


Рис. 1. Взаимодействие лития с элементами периодической системы:
1 – непрерывные растворы; 2 – органические твердые растворы; 3 – соединения;
4 – эвтектические смеси; 5 – нет взаимодействия; 6 – неизученные [4].

В основе ПСЭ лежит периодический закон, гласящий: «Свойства химических элементов, а также формы и свойства образуемых ими простых веществ и соединений находятся в периодической зависимости от величины зарядов ядер их атомов». Д.И. Менделеев вывел закон на основе сложенной им таблицы и сформулировал его следующим образом: «Свойства элементов, а потому и свойства образуемых ими простых и сложных тел, стоят в периодической зависимости от их атомного веса». Основным подтверждением действенности системы и закона было обнаружение предсказанных им элементов. Особенно примечательно то, что свойства найденных элементов и их соединений совпали с прогнозом. Также важно отметить, что Менделеев открыл системность в тогдашнем наборе химических элементов, оперируя данными о химическом пространстве из 11484 веществ [12], это даѐт основания полагать, что системообразующий фактор ПСЭ, может быть основой для естественной систематизации современного химического пространства.

Цель (задачи) исследования

Цель данной работы заключается в определении естественного системообразующего фактора и выявлении системных связей в современном химическом пространстве, с использованием опыта систематизации химических элементов.

Основной материал исследования

В контексте теоретико-множественных представлений ПСЭ можно выразить уравнениями:

$$M_э = \{M_I, M_{II}, M_{III}, M_{IV}, M_V, M_{VI}, M_{VII}\}$$

$$M_I \in \{H, He\},\ |M_I| = 2.$$

$$M_{II} \in \{Li, Be, B, C, N, O, F, Ne\},\ |M_{II}| = 8.$$

$$M_{III} \in \{Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar\}, |M_{III}| = 8.$$

$$M_{IV} \in \begin{Bmatrix} K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, \\ Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr \end{Bmatrix},$$
$$|M_{IV}| = 18.$$

$$M_V \in \begin{Bmatrix} Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, \\ Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe \end{Bmatrix},$$
$$|M_V| = 18.$$

$$M_{VI} \in \begin{Bmatrix} Cs, Ba, La, Ce, \mathrm{Pr}, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, \\ Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, \mathrm{Re}, Os, \\ Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn \end{Bmatrix},$$
$$|M_{VI}| = 32.$$

$$M_{VII} \in \begin{Bmatrix} Fr, Ra, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, \\ Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr, Rf, \\ Db, Sg, Bh, Hs, Mt, Ds, Rg, Cn, Nh, \\ Fl, Mc, Lv, Ts, Os \end{Bmatrix},$$
$$|M_{VII}| = 32.$$

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

где $M_э$ – множество всех элементов; M_I – множество элементов первого периода; $M_I \in \{H,He\}$ – состав множества; $|M_I|=2$ – мощность множества.

Такое представление отображает множество элементов как систему, состоящую из семи подмножеств с закономерным возрастанием мощности (2,8,8,18,18,32,32). Некоторые свойства системы описаны ниже:

$$|M_э| = 118,$$
$$M_{э\max}^{T_{пл}} = 3550^\circ \text{C},$$
$$M_{э\min}^{T_{пл}} = -272^\circ \text{C},$$

где $|M_э|$ – мощность множества, равная количеству элементов в периодической системе; $M_{э\max}^{T_{пл}}$ – максимальное значение температуры плавления вещества (температура плавления углерода); $M_{э\min}^{T_{пл}}$ – минимальное значение температуры плавления вещества (температура плавления гелия).

На рис. 1 представлен баланс температур плавления 99 элементов.

Как известно, свойства определенного элемента взаимосвязаны со свойствами соседних элементов (рис. 2) [13], кроме того, система наглядно показывает соотношения между свойствами их соединений (1).

$$\frac{M^O}{M^S} \approx \frac{M^F}{M^{Cl}} \quad (1),$$

где M^O – множество соединений с кислородом; M^S – множество соединений с серой; M^F – множество соединений с фтором; M^{Cl} – множество соединений с хлором.

Следовательно, свойства множества химических соединений определѐнного элемента будут находиться в периодической зависимости со свойствами аналогичных множеств системы. Под свойствами множества химических соединений нужно понимать статистические характеристики выделенной системы, ими могут быть: мощность, распределение веществ по определѐнному свойству, минимальный и максимальный показатель свойства и т.д. С целью проверки умозаключения, выраженного в формуле 1, было взято химическое пространство из справочника [14], состоящее из 10063 веществ, из него выделено химическое пространство двухэлементных соединений – множество химических веществ, состоящих из различных комбинаций двух элементов.

Сформированное множество можно представить в следующем виде:

$$M_{2э} = \left\{M_{2э}^{H}, M_{2э}^{He}, M_{2э}^{Li}, M_{2э}^{Be}, ...M_{2э}^{Og}\right\}$$
$$|M_{2э}| = 2261,$$
$$M_{2э\max}^{T_{пл}} = 3960^\circ \text{C},$$
$$M_{2э\min}^{T_{пл}} = -224^\circ \text{C},$$

где $M_{2э}$ – множество двухэлементных соединений; $|M_{2э}|$ – мощность множества двухэлементных соединений; $M_{2э\max}^{T_{пл}}$ – максимальное значение температуры плавления вещества в множестве двухэлементных соединений (температура плавления карбида гафния); $M_{2э\min}^{T_{пл}}$ – минимальное значение температуры плавления в множестве двухэлементных соединений (температура плавления фторида кислорода).

Распределение на рис. 3 отличается от свойств системы одноэлементных веществ, это объясняется преобладанием в справочном материале органических соединений, т.е. $M_{2э}^{C}$ значительно больше, чем остальные подмножества.

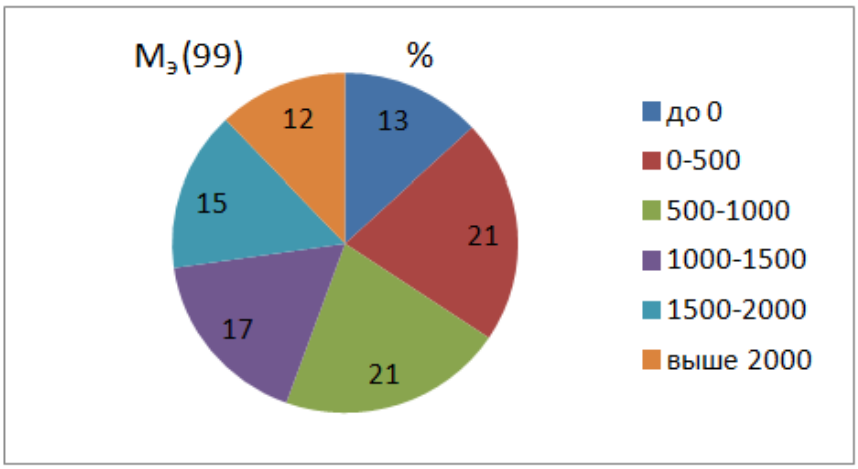


Рис. 1. Распределение элементов по температуре плавления (°C)

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

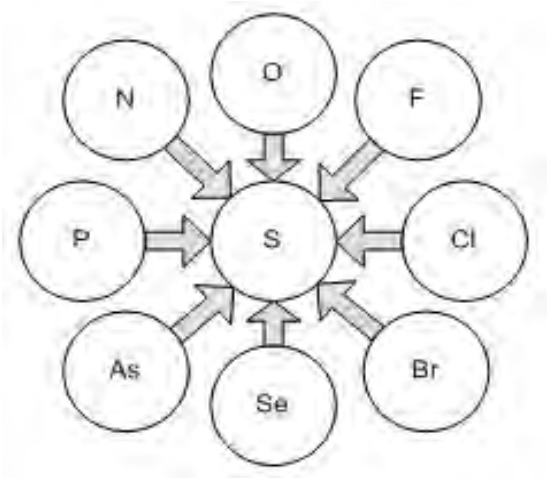


Рис. 2. Схема связей элементов

Чтобы привести исследуемое множество к однородности, из него были убраны вещества с углеродом ($M_{2э} \cup M_{2э}^{C} = M_{2э}^{безC}$), в результате образовалось множество со следующими свойствами:

$$\left|M_{2э}^{безC}\right| = 1532,$$

$$M_{2э}^{безC\,T_{пл}}{}_{\max} = 3300^{\circ}\,\text{C},$$

$$M_{2э}^{безC\,T_{пл}}{}_{\min} = -224^{\circ}\,\text{C},$$

где $M_{2э}^{безC}$ – множество двухэлементных соединений без углерода; $\left|M_{2э}^{безC}\right|$ – мощность множества двухэлементных соединений без углерода; $M_{2э}^{безC\,T_{пл}}{}_{\max}$ – максимальное значение температуры плавления вещества в множестве двухэлементных соединений без углерода (температура плавления нитрида гафния); $M_{2э}^{безC\,T_{пл}}{}_{\min}$ – минимальное значение температуры плавления вещества в множестве двухэлементных соединений без углерода (температура плавления фторид кислорода).

Сравнение свойств $M_{э}$ и $M_{2э}^{безC}$ показало их общую закономерность (см. рис. 1 и 4), поэтому, для дальнейшего расширения метода систематизации подмножества ($M_{2э}^{H}, M_{2э}^{He}, M_{2э}^{Li}, M_{2э}^{Be}, \ldots M_{2э}^{Og}$) были расположены в соответствии с ПСЭ.

На рис. 5 представлена часть сформированной системы, где наблюдается четкая тенденция по периодам и группам, мощность множеств возрастает слева направо, и убывает сверху вниз, с мышьяком наименьшее количество соединений, с фтором наибольшее. Наблюдается тенденция уменьшения тугоплавких веществ по диагонали от азота к брому.

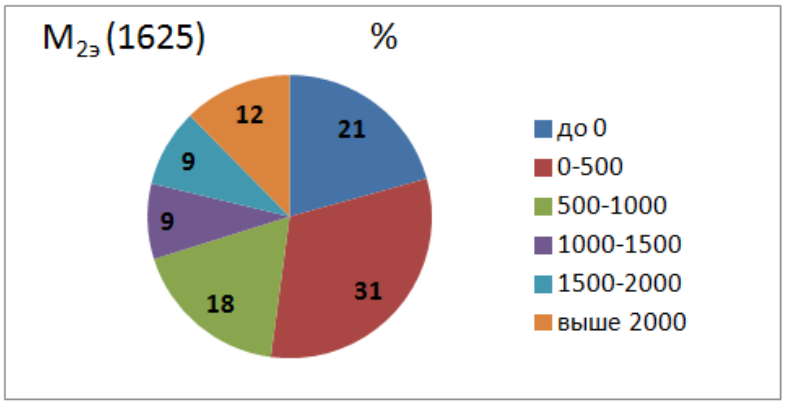


Рис. 3. Распределение двухэлементных соединений по температуре плавления (°C)

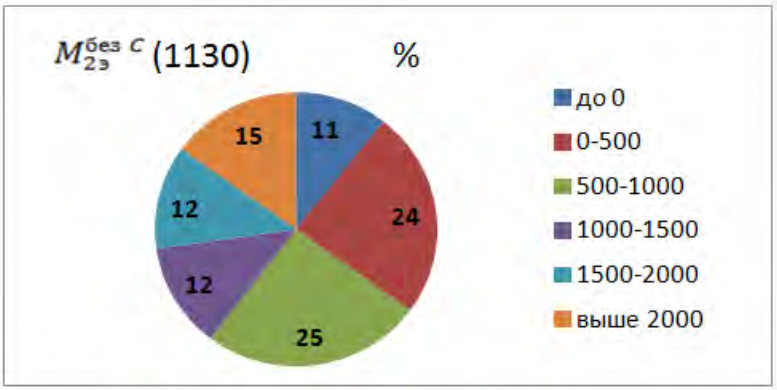


Рис. 4. Распределение двухэлементных соединений по температуре плавления (°C) в множестве без углерода

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

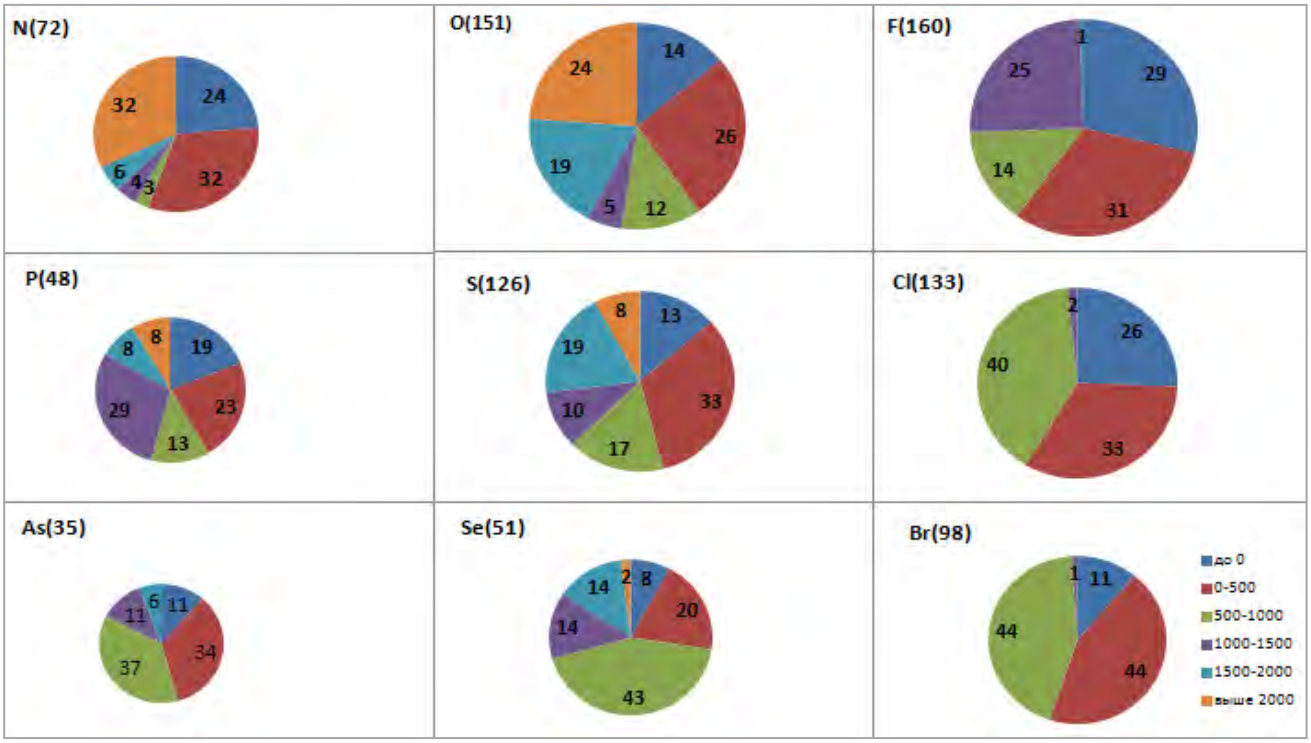


Рис. 5. Свойства подмножеств $M_{2э}$
(мощность и распределение по температуре плавления)

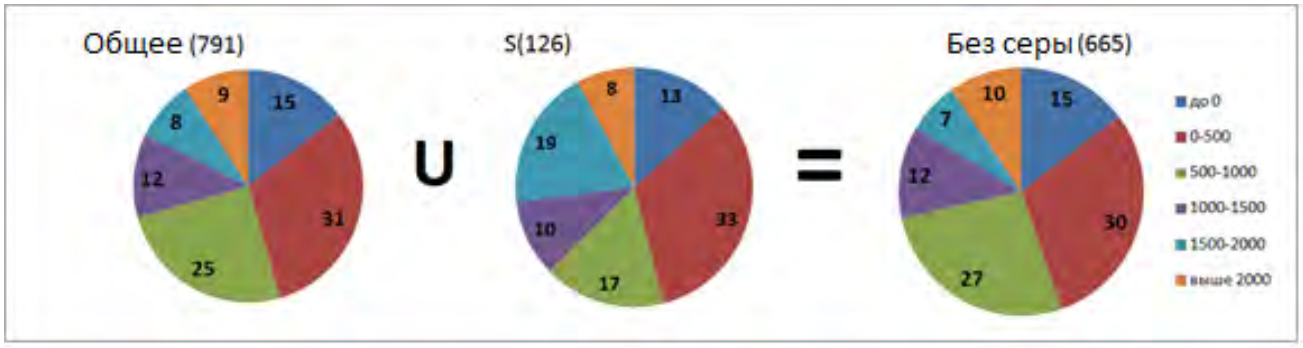


Рис. 6. Результаты исследования двухэлементного
химического пространства

В группе фтора отсутствуют тугоплавкие вещества, но преобладают легкоплавкие с температурой плавления до 1000°С.

Также примечательно то, что распределение в общем множестве на рис. 5 достаточно схоже с распределением в множестве серы. При вычитании из общего множества серосодержащих веществ его распределение практически не меняется, следовательно, центральное множество имеет средние показатели (рис. 6).

Таким образом, в рамках принципов систематизации элементов, обнаруживается взаимосвязь в химическом пространстве двухэлементных соединений. Новые факты периодичности вскрывают четкие связи между сложными веществами, тем самым намечая пути к их естественной систематизации.

Вывод

1. При рассмотрении химического пространства в рамках периодического закона проявляются системные взаимосвязи. Множество двухэлементных веществ с определенным элементом находится в периодической взаимосвязи с аналогичными множествами, это даèт основание предполагать, что химическое пространство является сбалансированной системой подобно таблице Менделеева.

2. Для расширения рассмотренной методики систематизации химического пространства необходимо:

– пользуясь базами химических веществ, провести статистический анализ максимально полного химического пространства;

– расширить перечень анализируемых свойств;

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

– проанализировать структуру подмножеств по элементам;

– оценить предсказательную возможность системы.

Список литературы

1. www.cas.org
2. Вяткин В.Б. Синергетическая теория информации. Часть 2. Отражение дискретных систем в плоскости признаков их описания // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2009. – №45(1). Режим доступа: http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/12.pdf
3. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3т. / Под общ. ред. Н.П. Лякишев. – М. Машиностроение, 1996, 1997, 2001, т.1-3, 992, 1024, 1320 с.
4. Корнилов И.И., Матвеева Н.М., Пряхина Л.И., Полякова Р.С. Металлохимические свойства элементов периодической системы. Монография-справочник. – «Наука»: М. – 1986.
5. Муминов У.А. Диаграммы состояния и термодинамические свойства сплавов на основе бария. 02.00.04. Автореферат диссертации на соискание учѐной степени кандидата химических наук. – Душанбе. – 2010.
6. Джураев Т.Д., Ходжаев Ф.К., Муслимов И.Ш., Махмадуллоев А.Х. Оценка степени изученности двойных диаграмм состояния систем свинца с элементами периодической таблицы. Доклады академии наук республики Таджикистан. – 2014. Т.57, №5, с. 391-394.
7. Рахимов Ф. К. Диаграммы состояния и термодинамические свойства сплавов европия и иттербия. 02.00.04. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук. – Душанбе. – 2015.
8. Халимова М.И. Взаимодействие бериллия с элементами периодической таблицы и разработка сплавов с его участием. 02.00.04. Диссертация на соискание учѐной степени кандидата химических наук. – Душанбе. – 2015.
9. Dmitry S. Karlov, Sergey Sosnin, Igor V. Tetko and Maxim V. Fedorov. Chemical space exploration guided by deep neural networks. This journal is © The Royal Society of Chemistry 2019 RSC Adv., 2019, 9, 5151-5157.
10. Jean-Louis Reymond and Mahendra Awale. Exploring chemical space for drug discovery using the chemical universe database. ACS Chem. Neurosci. 2012, 3, 649-657.
11. Zahed Allahyari and Artem R. Oganov, Nonempirical Definition of the Mendeleev Numbers: Organizing the Chemical Space: J. Phys. Chem. C 2020, 124, 43, 23867-23878.
12. Wilmer Leal, Eugenio J. Llanos, Peter F. Stadler,Jurgen Jost, Guillermo Restrepo. The chemical space from which the periodic system arose. Max-Planck-Institut fur Mathematikin den Naturwissenschaften Leipzig; August 21, 2019.
13. Семишин В.И. Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева. – Издво «Химия», 1972 г.
14. Кипер Р.А. Свойства веществ: Справочник по химии / Р. А. Кипер. – Хабаровск, 2013. – 1016 с.

A.N. Martynenko
Donetsk National Technical University (Donetsk)

SYSTEMATIZATION OF THE CHEMICAL SPACE OF TWO-ELEMENT COMPOUNDS

Background. *The modern chemical space is a colossal array of substances, between which there are no clear connections. Scientists distinguish various groups of substances (organics, alloys, silicates, etc.), but do not consider them in aggregate, thereby not asking questions about the laws that lie in their formation. Attempts are being made today to represent parts of the chemical space, but they do not carry systemic views.*

Materials and/or methods. *As a working hypothesis, the position was used that chemical elements and two-element substances are considered as genetically related sets within the framework of the Mendeleev table. From the point of view of set-theoretic concepts, the chemical space is considered as a set of subsets of chemical compounds with certain elements. The properties of subsets are statistical data. Statistical analysis was carried out in Microsoft Excel.*

Results. *A method for systematizing the chemical space has been developed and tested on a variety of two-element compounds. When considering the chemical space within the framework of the periodic law, systemic relationships appear. In many two-element compounds, the periodicity of the properties of subsets, which is a set of binary chemicals with a certain element, was found.*

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

Conclusion. *Many two-element substances with a certain element are in periodic relationship with similar multitudes, which suggests that the chemical space is a balanced system like the Mendeleev table.*

Keywords: *chemical space, set, system, periodicity.*

Сведения об авторе
А.Н. Мартыненко
SPIN-код: 7795-9758
Телефон: +380 (71) 370-97-21
Эл. почта: estet_08@mail.ru

Статья поступила 24.12.2021 г.
© А.Н. Мартыненко, 2021
Рецензент д.т.н., проф. К.Н. Маренич



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

УДК 67.02/67.08

Д.А. Капустин /к.т.н./
ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный педагогический университет» (Луганск)
А.В. Кущенко /к.т.н./
ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля» (Луганск)

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЛАНИРОВАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ВОДОУГОЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ

Выполнен регрессионный анализ результатов реологических исследований высококонцентрированных водоугольных суспензий с помощью современных средств обработки данных. Представлены зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига, концентрации твердой фазы, зольности исходного угля, выхода летучих веществ и гранулометрического состава (критерия бимодальности).

Ключевые слова: *водоугольная суспензия, анализ, регрессионная зависимость, напряжение сдвига, вязкость, реологические характеристики, фактор влияния.*

Постановка проблемы

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью разработки технических и технологических решений, обеспечивающих высокоэффективное и экологически безопасное использования топлива в виде водоугольной суспензии (ВУС) в теплоэнергетических установках, а также расширением применения ВУС в других аппаратах различного назначения, использующих в настоящее время более дорогие виды топлива (газ, мазут и др.).

Согласно энергетической стратегии России основную часть электроэнергии по-прежнему планируется получать на тепловых электростанциях [1], что характерно и для Донбасса. При ожидаемом снижении добычи нефти и газа важным становится вопрос их частичной замены на водоугольное топливо. При это в Федеральном законе «Об энергосбережении» уделяется внимание разработке и использованию альтернативных видов топлив, в том числе ВУС, что особенно актуально для ДНР и ЛНР.

Особенно насущна проблема повышения потребительских свойств и утилизация отходов обогащения каменных углей и антрацитов, переработка которых традиционными способами вызывает ряд проблем, связанных, в частности, с высокой зольностью и влажностью, а также необходимостью обезвоживания, что при существующих подходах экономически не целесообразно.

Тем не менее, анализ литературных источников показывает перспективность применение водоугольной суспензии в качестве топлива с использованием отходов угледобычи, углепереработки и других производств [1…4].

Серьезным препятствием на пути широкого применения водоугольной суспензии в качестве топлива является сложность управления реологическими параметрами на этапах ее производства, транспортировки и сжигания. В технологиях, применяемых в настоящее время [3…5], эти задачи решаются различными способами: подбором гранулометрического состава, зольности, концентрации твердой фазы, режима течения, пластификаторов и т. п.

В этой связи актуальным представляется исследование реологии ВУС и определение зависимостей для расчета напряжения сдвига и вязкости от скорости сдвига, концентрации твердой фазы, гранулометрического состава (критерий бимодальности), зольности исходного угля и выхода летучих веществ, что позволит повысить точность вычисления основных параметров течения такой среды.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ предметной области позволил установить, что существует ряд независимых направлений исследований свойств водоугольных суспензий и топлива. Среди них следует выделить работы, направленные на изучение и оптимизацию как свойств исходного материала (угля), его содержания в суспензии, так и режимов течения по трубопроводу [2,6].

Кроме того, следует обратить внимание на исследования, направленные на получение заданных свойств ВУС путем использования химических добавок [3].

В работах [1,3,7,8] представлены рекомендации по рациональной скорости течения ВУС в каналах круглого сечения, которые соответствуют скорости сдвига 20 $с^{-1}$. При этом постоянство

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

скорости сдвига сохраняется для всех диаметров трубопроводов. В работах [2,3,5] также отмечено, что зачастую наблюдается искривление линейной зависимости напряжения от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ при ее величине менее 9…16 $с^{-1}$. Однако в дальнейших расчетах данный факт игнорируется, что приводит к значительному увеличению погрешности определения реологических показателей при малых скоростях сдвига.

Во всех изученных научных работах учитывается влияние концентрации твердого компонента *С* на свойства водоугольной суспензии, а предельным рекомендованным значением является массовое содержание в 70 %. В работе [2] произведена оценка реальной массовой концентрации с учетом пористости угля, полученные результаты на 1…3% (в зависимости от типа угля) превышают значения, рассчитанные по классической методике, в связи с чем, предельным значением содержания твердой фазы для обеспечения текучести среды следует считать 67 %.

В работах [2,4,8] произведены исследования по оптимизации гранулометрического состава водоугольных сред, из которых следует, что текучесть и стабильность ВУС напрямую зависит от соотношения крупной и мелкой фракций угля, в связи с чем основным показателем качества дисперсного состава (при заданном срединном диаметре частиц) является критерий бимодальности *Г*, который определяется как отношение содержания тонкодисперсной и грубодисперсной части рассева (относительно промежуточной фракции).

Зольность исходного топлива (угля) является одним из важнейших показателей при расчете реологических свойств водоугольной суспензии. Ее увеличение приводит к резкому возрастанию напряжения сдвига и вязкости среды [4]. Наряду с этим исследования данного свойства носят разрозненный характер, неполными являются данные для высокозольных углей и отходов обогащения. С точки зрения экономической целесообразности и возможности поддержания окислительных реакций предельным значением зольности следует считать величину в 35 %.

Выход летучих веществ является характерным показателем каждого типа угля и редко учитывается при исследовании реологических свойств, в то время как последние испытывают значительное влияние со стороны этого параметра. Его использование в качестве фактора влияния позволит, в первую очередь, перевести качественный показатель – тип угля в количественный, и учесть при расчете напряжения сдвига и вязкости. Максимальное его значение соответствует газовым углям и достигает 45 %, минимальное – антрацитам и колеблется в районе 5 % [3,5].

Таким образом, необходимы исследования реологических свойств высококонцентрированных водоугольных суспензий и определения комплексных зависимостей напряжения сдвига и вязкости ВУС от скорости сдвига, концентрации твердой фазы, критерия бимодальности и основных свойств угля.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является определение зависимостей напряжения сдвига и эффективной вязкости ВУС от скорости сдвига, концентрации твердой фазы, гранулометрического состава (критерий бимодальности), зольности исходного угля и выхода летучих веществ путем обработки результатов планируемых реологических экспериментов.

Основной материал исследования

На начальном этапе работы проведены исследования по определению геометрической формы зависимостей напряжения сдвига и эффективной вязкости. Полученные результаты (для угля марки Г) приведены на рис. 1 и 2.

Из анализа зависимостей величины касательных напряжений и показателя вязкости, следует что для диапазона изменения скорости сдвига от начального значения до 9 $с^{-1}$ характерна существенно криволинейная форма кривых (отклонение от линейной характеристики составляет порядка 20…50 %). В связи с этим авторами предложено разделение регрессионных зависимостей на два диапазона по скорости сдвига от 1,8 до 9 $с^{-1}$ и от 9 до 48,6 $с^{-1}$ с определением автономных аналитических выражений.

Исходя из результатов предварительного анализа, в том числе учитывая наличие участка существенной кривизны в области определения уравнений регрессии для дальнейших испытаний авторами спланирован и реализован 3-х уровневый пятифакторный эксперимент. При этом учитывалось также, что осуществление эксперимента с числом факторов более 5-ти при количестве уровней более 3-х приводит к значительному увеличению как объемов, так и продолжительности экспериментов, а также что выполнение такого исследования было бы технически гораздо более сложным.

Диапазоны изменений и интервалы варьирования скорости сдвига $\dot{\gamma}$, концентрации твердой фазы С, критерия бимодальности Г, зольности исходного угля A^d и выхода летучих веществ $V^Г$ принимали следующие значения (табл. 1).

Для обработки результатов экспериментов использовано приложение Statistica (ее

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

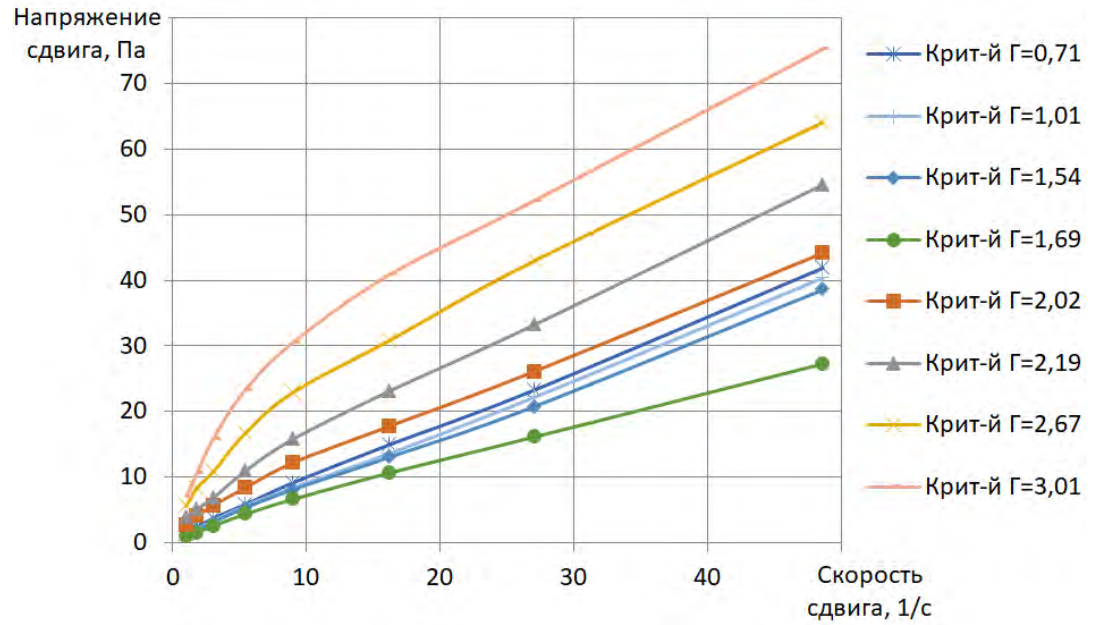


Рис. 1. Зависимость напряжения от скорости сдвига при концентрации твердой фазы С=64,5 %; зольности A^d=25,2 %; выходе летучих веществ $V^Г$=45 %

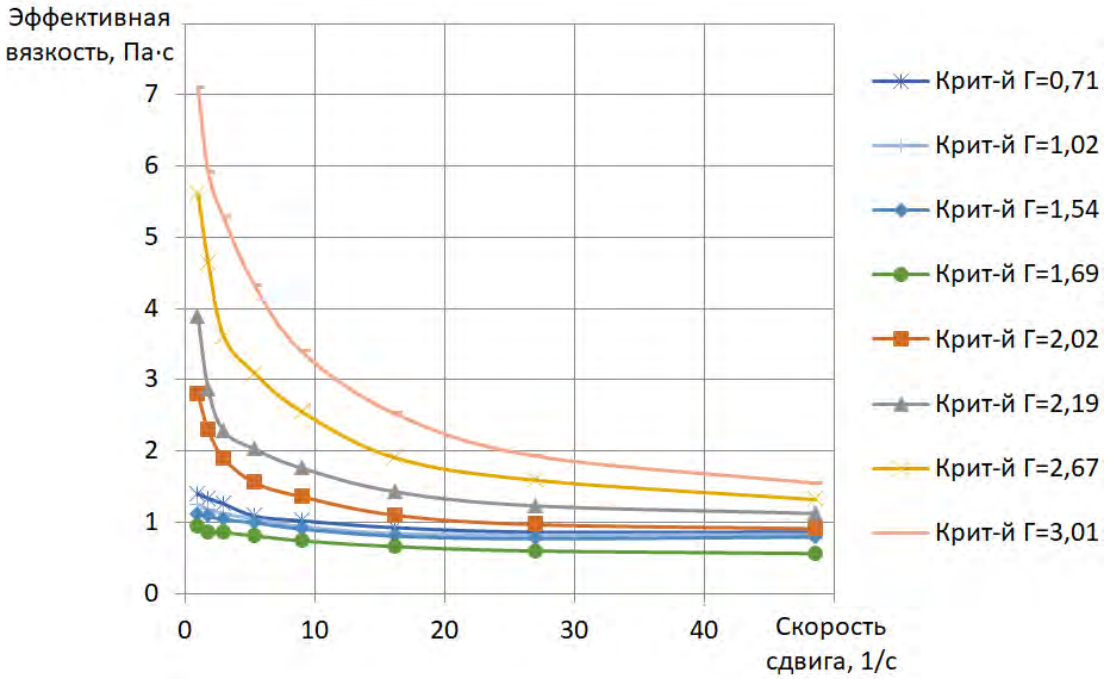


Рис. 2. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига при концентрации твердой фазы С=64,5 %; зольности A^d=25,2 %; выходе летучих веществ $V^Г$=45 %

бесплатная версия). В программе использованы инструменты промышленного эксперимента DOE для экспериментов с тремя уровнями варьирования факторов (рис. 3) [9].

Выбраны трехуровневые планы для 5-ти независимых факторов. В качестве матриц планирования использованы матрицы Бокса-Бенкена, матрицы дробного и полнофакторного экспериментов. Произведено заполнение матриц планирования значениями функции отклика, согласно уровней варьирования аргументов.

Также произведен расчет коэффициентов регрессии, произведена оценка их значимости и дисперсия, с помощью соответствующих инструментов программного продукта (рис. 4).

После получения итогового вида уравнений регрессии произведена сравнительная оценка точности расчета напряжения сдвига и эффективной вязкости для различных значений и уровней варьирования факторов рис. 5 и 6 для участка 1 и 2 соответственно (табл. 2, 3).

Анализ представленных на рис. 5 и 6 кривых, а также табл. 2 показал, что хотя дробные факторные эксперименты показывают более точные

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

Табл. 1. Значения диапазонов изменений и интервалов варьирования факторов влияния

Факторы влияния (независимые параметры)	Факторы				
	Скорость сдвига $\dot{\gamma}$, 1/с	Концентрация С, %	Зольность A^d, %	Выход летучих веществ $V^Г$, %	Критерий бимодальности Г
1-й участок					
Нулевой уровень	5,4	64,5	25	25	2
Интервал варьирования	3,6	2,5	10	20	1
Верхний уровень	9	67	35	45	3
Нижний уровень	1,8	62	15	5	1
2-й участок					
Нулевой уровень	28,8	64,5	25	25	2
Интервал варьирования	19,8	2,5	10	20	1
Верхний уровень	48,6	67	35	45	3
Нижний уровень	9	62	15	5	1

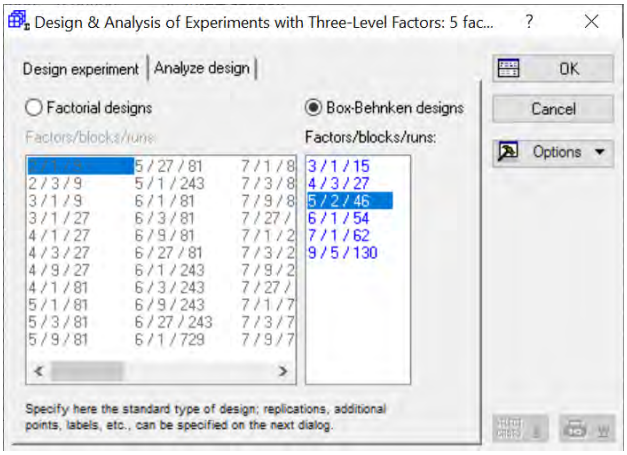


Рис. 3. Окно выбора типа матрицы планирования эксперимента

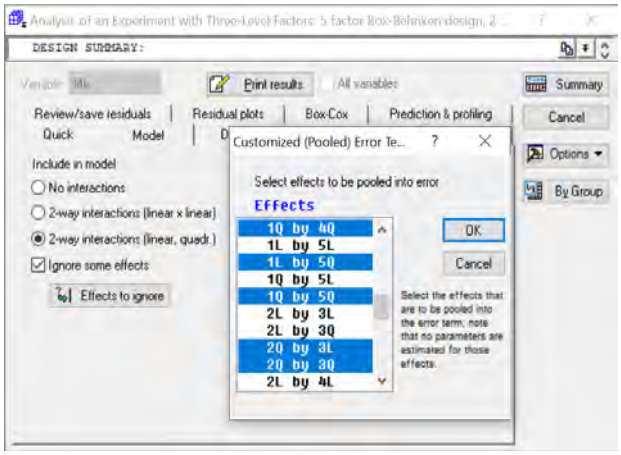


Рис. 4. Исключение из матрицы планирования малозначимых сочетаний факторов

Табл. 2. Значения напряжения сдвига и величина относительного отклонения

№ п/п	Величина напряжения сдвига τ, Па				Относительное отклонение, %		
	Бокс-Бенкен	Дробн. факторн. план	Полн. факторн. План.	Эксперимент	Бокс-Бенкен	Дробн. факторн. план	Полн. факторн. План.
1-й участок							
1	2,3	4,08	5,05	4,55	97,83	11,52	9,90
2	8,7	7,79	8,9	8,70	0,00	11,68	2,25
3	13,43	11,1	11,66	11,96	10,98	7,71	2,53
2-й участок							
1	30,44	30,66	30	28,27	7,14	7,81	5,78
2	39,1	42,05	46,5	50,04	27,97	18,99	7,61
3	47,47	53,43	63,4	67,69179	42,60	26,69	6,77

значения для точек, представленных в матрицах планирования (план Бокса-Бенкена), в иных случаях точность расчета в значительной степени снижается.

В первую очередь это касается участка 1 и обусловлено сложной формой зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига, концентрации твердой фазы,

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

зольности исходного угля, выхода летучих веществ и критерия бимодальности.

Табл. 3. Значения эффективной вязкости и величина относительного отклонения

№ п/п	Величина эффективной вязкости $\mu_э$, Па·с				Относительное отклонение, %		
	Бокс-Бенкен	Дробн. факторн. план	Полн. факторн. План.	Эксперимент	Бокс-Бенкен	Дробн. факторн. план	Полн. факторн. План.
1-й участок							
1	3,29	2,95	2,73	2,53	23,17	14,31	7,41
2	1,61	1,64	1,69	1,61	0,07	1,76	4,67
3	1,09	1,55	1,45	1,33	21,87	14,30	8,39
2-й участок							
1	1,63	1,42	1,27	1,33	18,50	6,45	4,60
2	1,06	1,04	0,99	0,94	11,16	9,45	4,88
3	0,86	0,95	0,88	0,79	7,58	16,34	9,68

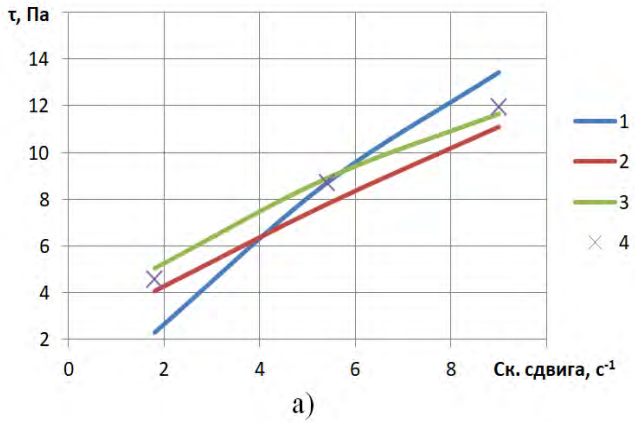


Рис. 5. Зависимости напряжения и эффективной вязкости от скорости сдвига для 1 участка (концентрация С=64,5 %, зольность A^d=25 %, выход летучих $V^Г$=25 %, критерий бимодальности Г=2)
1 – регрессионная зависимость плана Бокса-Бенкена; 2– регрессионная зависимость дробного факторного плана; 3 – регрессионная зависимость полного факторного плана; 4 – экспериментальные данные

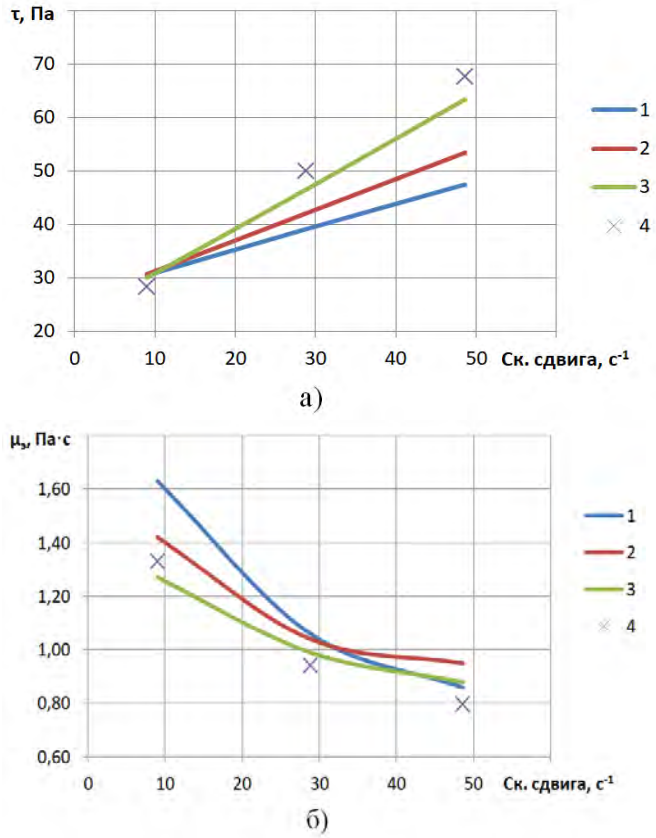


Рис. 6. Зависимости напряжения и эффективной вязкости от скорости сдвига для 2 участка (концентрация С=64,5 %, зольность A^d=25 %, выход летучих $V^Г$=25 %, критерий бимодальности Г=2)
1 – регрессионная зависимость плана Бокса-Бенкена; 2 – регрессионная зависимость дробного факторного плана; 3 – регрессионная зависимость полного факторного плана; 4 – экспериментальные данные

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

В результате уравнения регрессии в кодированных параметрах для участка 1 представлены выражениями 1 и 2 для напряжения сдвига и эффективной вязкости соответственно.

$$y(\tau) = 9{,}71 + 3{,}08x_1 - 0{,}83x_1^2 + 5{,}67x_2 + 1{,}28x_2^2 + 0{,}74x_3 + 0{,}87x_4 - 2{,}65x_4^2 + 6{,}68x_5 + 4{,}95x_5^2 + 3{,}95x_1x_2 + 2{,}12x_1x_2^2 - 0{,}78x_1^2x_2 + 1{,}99x_1x_3 + 0{,}5x_1x_3^2 + 1{,}56x_1x_4 + 2{,}7x_1x_5 + 2{,}08x_1x_5^2 - 0{,}76x_1^2x_5 - 0{,}55x_1^2x_5^2 + 3{,}25x_2x_3 - 1{,}11x_2x_3^2 + 2{,}32x_2^2x_3 + 0{,}8x_2^2x_3^2 + 4{,}25x_2x_4 + 2{,}31x_2x_4^2 + 3{,}89x_2^2x_4 + 3{,}73x_2^2x_4^2 + 6{,}89x_2x_5 + 4{,}81x_2x_5^2 + 3{,}84x_2^2x_5 + 2{,}53x_2^2x_5^2 + 0{,}43x_3x_4 + 1{,}48x_3x_4^2 - 0{,}53x_3^2x_4 + 0{,}58x_3^2x_4^2 + 2{,}78x_3x_5 + 1{,}86x_3x_5^2 + 0{,}62x_3^2x_5 + 0{,}49x_3^2x_5^2 + 4{,}29x_4x_5 + 3{,}16x_4x_5^2 + 0{,}62x_4^2x_5 \quad (1)$$

$$y(\mu_э) = 1{,}612 - 0{,}205x_1 + 0{,}078x_1^2 + 0{,}846x_2 + 0{,}067x_2^2 + 0{,}051x_3 - 0{,}056x_4 - 0{,}643x_4^2 + 0{,}982x_5 + 0{,}816x_5^2 - 0{,}992x_1x_2 - 0{,}592x_1x_2^2 + 0{,}518x_1^2x_2 + 0{,}318x_1^2x_2^2 - 0{,}312x_1x_3 - 0{,}098x_1x_3^2 + 0{,}138x_1^2x_3 - 0{,}617x_1x_4 + 0{,}351x_1^2x_4 - 1{,}174x_1x_5 - 0{,}732x_1x_5^2 + 0{,}642x_1^2x_5 + 0{,}387x_1^2x_5^2 + 0{,}715x_2x_3 + 0{,}247x_2x_3^2 + 0{,}508x_2^2x_3 + 0{,}168x_2^2x_3^2 + 1{,}007x_2x_4 + 0{,}396x_2x_4^2 + 0{,}901x_2^2x_4 + 0{,}876x_2^2x_4^2 + 1{,}735x_2x_5 + 1{,}186x_2x_5^2 + 0{,}973x_2^2x_5 + 0{,}594x_2^2x_5^2 + 0{,}139x_3x_4 - 0{,}308x_3x_4^2 - 0{,}114x_3^2x_4 + 0{,}13x_3^2x_4^2 + 0{,}659x_3x_5 + 0{,}432x_3x_5^2 + 0{,}159x_3^2x_5 + 0{,}116x_3^2x_5^2 + 1{,}118x_4x_5 + 0{,}809x_4x_5^2 + 0{,}192x_4^2x_5 \quad (2)$$

Следует отметить, что величина достоверности аппроксимации для полученных уравнений регрессии составила R^2=0,988 и R^2=0,978 соответственно для зависимости 1 и 2. Это свидетельствует об адекватности описания характера поведения напряжения и эффективной вязкости в зависимости от приведенных факторов влияния для указанного диапазона варьирования.

Для участка 2 квадрики в кодированных параметрах представлены уравнениями 3 и 4.

$$y(\tau) = 27{,}06 + 9{,}48x_1 + 9{,}68x_2 + 1{,}49x_2^2 + 2{,}98x_3 + 0{,}54x_3^2 + 2{,}56x_4 - 4{,}55x_4^2 + 11{,}46x_5 + 8{,}06x_5^2 + 11{,}45x_1x_2 + 6{,}56x_1x_2^2 + 0{,}98x_1^2x_2 + 0{,}62x_1^2x_2^2 + 6{,}17x_1x_3 + 2{,}4x_1x_3^2 + 0{,}5x_1^2x_3 + 6{,}23x_1x_4 + 3{,}23x_1x_4^2 + 0{,}7x_1^2x_4 + 1{,}03x_1^2x_4^2 + 4{,}75x_1x_5 + 3{,}91x_1x_5^2 - 0{,}64x_1^2x_5 + 8{,}23x_2x_3 + 3{,}58x_2x_3^2 + 6{,}78x_2^2x_3 + 3{,}92x_2^2x_3^2 + 10{,}65x_2x_4 + 11{,}23x_2x_4^2 + 10{,}88x_2^2x_4 + 10{,}03x_2^2x_4^2 + 10{,}64x_2x_5 + 7{,}86x_2x_5^2 + 5{,}77x_2^2x_5 + 4{,}62x_2^2x_5^2 + 0{,}86x_3x_4 + 3{,}03x_3x_4^2 - 1{,}25x_3^2x_4 + 5{,}04x_3x_5 + 3{,}78x_3x_5^2 + 1{,}17x_3^2x_5 + 1{,}04x_3^2x_5^2 + 5{,}5x_4x_5 + 4{,}84x_4x_5^2 + 1{,}95x_4^2x_5 \quad (3)$$

$$y(\mu_э) = 0{,}986 - 0{,}179x_1 + 0{,}109x_1^2 + 0{,}253x_2 - 0{,}023x_2^2 + 0{,}031x_3 - 0{,}167x_4^2 + 0{,}333x_5 + 0{,}256x_5^2 - 0{,}413x_1x_2 - 0{,}226x_1x_2^2 + 0{,}318x_1^2x_2 + 0{,}18x_1^2x_2^2 - 0{,}161x_1x_3 - 0{,}028x_1x_3^2 + 0{,}128x_1^2x_3 + 0{,}042x_1^2x_3^2 - 0{,}174x_1x_4 + 0{,}041x_1x_4^2 + 0{,}144x_1^2x_4 - 0{,}445x_1x_5 - 0{,}304x_1x_5^2 + 0{,}284x_1^2x_5 + 0{,}208x_1^2x_5^2 + 0{,}342x_2x_3 + 0{,}135x_2x_3^2 + 0{,}27x_2^2x_3 + 0{,}135x_2^2x_3^2 + 0{,}432x_2x_4 + 0{,}401x_2x_4^2 + 0{,}427x_2^2x_4 + 0{,}398x_2^2x_4^2 + 0{,}516x_2x_5 + 0{,}377x_2x_5^2 + 0{,}284x_2^2x_5 + 0{,}219x_2^2x_5^2 + 0{,}144x_3x_4^2 - 0{,}052x_3^2x_4 + 0{,}235x_3x_5 + 0{,}168x_3x_5^2 + 0{,}051x_3^2x_5 + 0{,}044x_3^2x_5^2 + 0{,}287x_4x_5 + 0{,}234x_4x_5^2 + 0{,}07x_4^2x_5 \quad (4)$$

Величина достоверности аппроксимации для полученного уравнения регрессии составила R^2=0,981 и R^2=0,976. Это свидетельствует об адекватности описания характера поведения эффективной вязкости в зависимости от приведенных факторов влияния для указанного диапазона

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

варьирования.

Вывод

В ходе проведенных исследований установлено, что для адекватного описания реологического поведения высококонцентрированных водоугольных дисперсных сред наиболее целесообразным является разделение кривой напряжения сдвига, а с ней и эффективной вязкости на 2 участка: криволинейный (зона пластической деформации) – область последовательного разрушения (по мере увеличения скорости сдвига) структуры среды, и прямолинейный – участок с разрушенной структурой квазипостоянным значением показателя структурной вязкости.

Опыты показали, что для описания зависимостей напряжения сдвига и эффективной вязкости от значительного числа факторов (скорость сдвига, концентрация твердого компонента, зольность исходного угля, выход летучих веществ, критерий бимодальности) целесообразно использовать матрицы полнофакторного эксперимента, которые позволяют повысить точность расчета на всем диапазоне измерений (предельное отклонение от экспериментальных точек не более 10 %).

Список литературы

1. Радзюк А.Ю. Методы и средства подготовки водоугольнои суспензии для теплотехнологических установок: дис. кандидата техн. наук/ Радзюк Александр Юрьевич. – Красноярск, 2005. - 128 с.
2. Баранов И.О. Повышение эффективности транспортировки высококонцентрированного водоугольного топлива в гидротранспортных системах промышленных предприятий: дис. кандидата техн. наук/ Баранов Игорь Олегович. – Днепропетровск, 2019. - 217 с.
3. Баранова М.П. Физико-химические основы получения топливных водоугольных суспензий: монография / М.П. Баранова, В.А. Кулагин. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. – 160 с.
4. Бойко Е.Е. Разработка методических основ сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий при плазменном сопровождении в котлоагрегатах ТЭС: дис.... кандидата техн. наук/ Бойко Екатерина Евгеньевна. - Новосибирск, 2018. – 162 с.
5. Овчинников Ю. В. Технология получения и исследования тонкодисперсных водоугольных суспензий: монография/ Ю.Б. Овчинников, Е.Е. Бойко. – Новосибирск: НГТУ, 2017. - 308 с.
6. Pan F. Full process control strategy of fuel based on water-coal ratio of ultra supercritical units/ F. Pan, Y. Zhu, X. Zhang // International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC). - 2011. - P. 3750-3753.
7. Perkins R. P. Coal slurry development program / R.P. Perkins, R.K. Man-fred // Chem.Eng.progr. – 1995. – N. 5. - P. 69-76.
8. Pulido J. E. Rheology of colombian coal-water slurry fuels: Effect of particle-size distribution / J.E. Pulido, C.P. Rojas, G. Acero // Coal Science, Amster-dam. – 2005. – P. 1585-1588.
9. Халафян А.А. Промышленная статистика: контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA: учебное пособие/ А.А. Халафян. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 384 с.

D.A. Kapustin / Dr. Sci. (Eng.)/
Lugansk State Pedagogical University (Lugansk)
A.V. Kushchenko /Cand. Sci. (Eng.)/
Lugansk State University named after Vladimir Dal (Lugansk)

RESULTS OF A PLANNED EXPERIMENT TO DETERMINE THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF A HIGHLY CONCENTRATED WATER-COAL SUSPENSION

Background. *The relevance of the study of the rheological characteristics of a highly concentrated water-angle suspension (WCS) is due to the need to develop technical and technological solutions that ensure its highly efficient and environmentally safe use as a fuel. The analysis of the subject area made it possible to establish that there are a number of independent areas of research on the properties of water-angle suspensions and fuels. Among them should be highlighted works aimed at studying and optimizing both the properties of the starting material (coal), its content in suspension, and the flow modes through the pipeline. The purpose of the study is to determine the dependence of the shear stress and the effective viscosity of the WCS on the shear rate, the concentration of the solid phase, the particle size distribution (bimodality criterion), the ash content of the original coal and the yield of volatile substances by processing the results of planned rheological experiments.*

Materials and/or methods. *From the analysis of the dependencies of the value of tangent stresses and the viscosity index, it follows that the range of change in the shear rate from the initial value to 9 s^{-1} is*

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

characterized by a significantly curved form of dependencies (the deviation from the linear characteristic is about 20-50%). In this connection, the regression equations were divided into two ranges by shear rate with the definition of autonomous expressions. The «Statistica» application (its free version) was used to process the results of the experiments. The program used the tools of the DOE industrial experiment with three levels of factor variation.

Results. *A comparative analysis of the accuracy of determining the response function was carried out based on Box-Behnken planning matrices, fractional and full-factor experiments. It has been found that although fractional factor experiments show more accurate values for points presented in planning matrices, in other cases the accuracy of the calculation is significantly reduced. First of all, this concerns the first section and is due to the complex shape of the dependence of shear stress and effective viscosity on influence factors.*

Conclusion. *In the course of the studies, it was found that in order to adequately describe the rheological behavior of highly concentrated water-angle dispersed media, it is most expedient to divide the shear stress curve, and with it the effective viscosity, into 2 sections: curved and rectilinear. To describe the dependence of shear stress and effective viscosity on a significant number of factors (shear rate, concentration of the solid component, ash content of the initial coal, yield of volatile substances, bimodality criterion), it is advisable to use matrices of a full-factor experiment that make it possible to increase the calculation accuracy over the entire measurement range.*

Keywords: *water-coal suspension, analysis, regression dependence, shear stress, viscosity, rheological characteristics, influence factor.*

Сведения об авторах

Д.А. Капустин
SPIN-код: 2350-9390
Author ID: 945762
Телефон: +380 (72) 139-12-68
Эл. почта: Kap-kapchik@mail.ru

А.В. Кущенко
Телефон: +380 (72) 200-30-33
Эл. почта: akm48848@gmail.com

Статья поступила 06.12.2021 г.
© Д.А. Капустин, А.В. Кущенко, 2021
Рецензент к.т.н., доц. И.Г. Дедовец



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



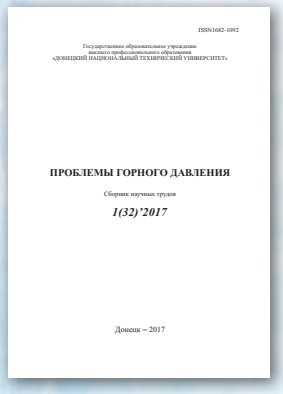
Научный журнал «Информатика и кибернетика»

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