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

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЕСТНИК

№4 (14) 2018 г.

metal

metal.donntu.org

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

13 ЛЕТ ИННОВАЦИЙ

vk.com/technopark_donetsk

ВЕСТНИК ДОННТУ №4(14)'2018

международный научно-технический журнал

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

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

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

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

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

Адрес: 28300, г. Донецк, ул. Артема, 58
Телефон +380 (62) 304-60-82
Эл. почта: vestnikdonntu@gmail.com
Интернет: vestnik.donntu.org

Вестник ДонНТУ
2018. №4(14)

ISSN 2518-1653 (online)

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

Свидетельство о государственной регистрации № 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 №6 от 21.12.2018

Формат 60×84$^{1/8}$. Заказ 1218.
Изд-во «Донецкая политехника», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

Ю.А. Стольная, Е.Д. Топалов, М.Ю. Пахомов
Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие 3

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Л.П. Вовк, Е.С. Кисель
Определение параметров разрушения пластины с трещиной при наличии концентраторов напряжения в процессе упругопластического деформирования 8

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Н.Г. Афендиков, А.В. Шендрик, К.Б. Ломаковский
Системный подход и системный анализ при решении задач повышения надежности проходческих комбайнов избирательного действия со стреловидными исполнительными органами 16

А.П. Кононенко, Р.И. Божко
Особенности применения радиальных нагнетателей в составе нагнетательных эрлифтных установок 24

О.Е. Шабаев, А.Ю. Довгань
Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации 34

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

К.Н. Маренич, И.Я. Чернов, Е.В. Золотарев
Моделирование процессов теплообмена внутри оболочки взрывобезопасной трансформаторной подстанции типа КТПВ-1000 методом конечных элементов 41

О.К. Маренич, И.В. Ковалёва
Элементы конструкции автоматического выключателя А37ХХ как фактор возникновения его потенциально опасного состояния 47

С.Н. Ткаченко, П.Р. Никифоров, А.В. Коваленко
Функциональное моделирование свойства невозрастания объема информации в системе SCADA на основе лабораторных электротехнических стендов 53

Д.О. Федюк, П.И. Поляков
Энергия связи и деформации в процессах полиморфных и фазовых изменений 60

Е.В. Чорноус
О влиянии переходного режима в шахтной участковой сети на длительность определения поврежденной фазы 70

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.Б. Бирюков, И.К. Кольба
Оценка параметрической чувствительности системы диагностики окисления металла 72

Ю.Е. Рубан
Методика расчета теплотехнических процессов в фурменной зоне доменной печи при подаче пылеугольного топлива 78

А.А.Троянский, В.И. Заика, В.Л. Жук, С.Н. Ратиев
Особенности вакуумного раскисления углеродистых сталей 84

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Л.Ф. Бутузова, В.Н. Шевкопляс, В.А. Колбаса, Г.Н. Бутузов
Структурные превращения молодых углей при полукоксовании и их взаимосвязь с образованием парамагнитных центров 88

ИНФОРМАЦИЯ

Требования к статьям, направляемым в редакцию 96

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(14)'2018

international scientific-technical journal

Founder and publisher Donetsk National Technical University (Donetsk)

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

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

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

Editorial council:
Artyukh V. G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Belomerya N. I. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Bershadsky I. A. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Biryukov A.B. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Butuzova L.F. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Vysotsky Y.B. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Gorbatko S. V. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Gorbatyuk S. M. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Dedovets I.G. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Eron'ko S.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Zaharov N. I. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Kovalev A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kozhevnikova I. A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)
Kondrahin V.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kononenko A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kurennyiy E. G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Prisedsky V.V. (Dr. Sci. /Chem./, 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) 304-60-82,
E-mail: vestnikdonntu@gmail.com
Internet: vestnik.donntu.org

Vestnik DonNTU
2018. No.4(14)

ISSN 2518-1653 (online)

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

Certificate of State Registration
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.6 dated 21.12.2018

Format 60×84$^{1/8}$. Order 1218
Publishing house
"Donetsk Polytechnic", 2018

CONTENTS

SCIENTIFIC NOTES

Yu.A. Stolnaya, E.D. Topalov, M.Yu. Pakhomov
Innovative perspectives of Donbass:
infrastructure and socio-economic development 3

ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

L.P. Vovk, E.S. Kisel
Determination of fracture parameters of the cracked plate
with stress concentrators in the process of elastic-plastic deformation 8

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION ENGINEERING

N.G. Afendikov, A.V. Shendrik, K.B. Lomakovskij
System approach and analysis in solving problems of improving the reliability
of selective action roadheaders with saggital working bodies 16

A.P. Kononenko, R.I. Bozhko
Application features of radial superchargers in discharge airlift units 24

O.Ye. Shabaev, A.Yu. Dovgan
Experimental studies of load characteristics of the motor drive of the working
body of KSP-35 roadheader in representative conditions of its operation 34

ELECTRICAL ENGINEERING

K.N. Marenich, I.Y. Chernov, Y.V. Zolotarov
Modeling of heat transfer processes inside the shell
of an explosion-proof transformer substation of KTPV-1000
by finite elements method 41

O.K. Marenich, I.V. Kovaljova
Design elements of auto switch A37XX as a factor of occurrence
of its potentially dangerous state 47

S.N. Tkachenko, P.R. Nikiforov, A.V. Kovalenko
Functional modeling of the feature of not increasing information volume
in the SCADA system on the basis of laboratory electrical stands 53

D.O. Fedyuk, P.I. Polyakov
The binding and deformation energy in the processes
of polymorphic and phase changes 60

E.V. Chornous
On the impact of the transitional mode in the mine site network
on damaged phase time definition 70

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

A.B. Biryukov, I.K. Kolba
Evaluation of parametric sensitivity of the metal oxidation diagnostics system 72

Yu.E. Ruban
The method for calculating thermal processes in the tuyere zone
of the blast furnace with the pulverized coal feed 78

A.A.Troyansky, V.I. Zaika, V.L. Zhuk, S.N. Ratiev
Features of vacuum deoxidation of carbon steels 84

CHEMICAL TECHNOLOGY

L.F. Butuzova, V.N. Shevkoplyas, V.A. Kolbasa, G.N. Butuzov
The structural transformation of young coals at semi-coking
and their relationship with the formation of paramagnetic centers 88

INFORMATION

Requirements for the papers submitted to the Editorial office 96

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.

Ю.А. Стольная, Е.Д. Топалов, М.Ю. Пахомов
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ИННОВАЦИОННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДОНБАССА: ИНФРАСТРУКТУРНОЕ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ

В рамках подготовки к проведению в мае 2019 года юбилейного 5-го Международного научного форума Донбасса рассмотрены основные цели и задачи, а также необходимость проведения мероприятия такого уровня для популяризации и совершенствования как научной деятельности, так и образовательного процесса в образовательных учреждениях Донецкого региона.

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

Международный научный форум, который проводится в Донецке на базе Донецкого национального технического университета, является крупнейшим съездом научно-исследовательских организаций, производственных предприятий, ученых, преподавателей и студентов образовательных учреждений из Донецкого региона, а также Российской Федерации и дальнего зарубежья.

Предстоящий форум в 2019 г. будет юбилейным – 5-м по счету. Впервые он прошел в 2015 г. (рис. 1) и с тех пор стал ежегодной платформой развития межгосударственного научного и научно-технического сотрудничества.

Основной задачей форума является публичное обсуждение задач государственной политики в сфере научно-технического развития, формирование механизмов научно-производственной кооперации, определение приоритетных направлений научно-технической и инновационной деятельности, а также обсуждение приоритетных задач обеспечения устойчивого развития Донбасса и повышения социально-экономической эффективности развития.

Выбор Донецкого национального технического университета в качестве центральной площадки для столь значимого мероприятия не случаен. На базе университета ежегодно проводится более 200 различных научных, научно-технических, культурных и творческих мероприятий. Это различные профессиональные и отраслевые выставки [1,2], конкурсы научных проектов и работ [3,4,5], научно-практические и научно-технические конференции [6,7,8] и семинары [9,10]. Как правило, данные мероприятия проводятся совместно с ведущими организациями и профессиональными сообществами [12,13].



Рис. 1. Демонстрация модели робота LEGO Mindstorms NXT «Chappi», 2015 г.

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

С 2015 г. в рамках форума также проходит выставка научно-технических разработок молодых ученых, которая всегда вызывает повышенное внимание первых лиц региона (рис. 2 и 3). В рамках форума традиционно проводится порядка 20 различных научно-технических и научно-практических конференций, семинаров, «круглых столов» и дискуссионных площадок с международным участием. В их числе такие значимые мероприятия, как:

– Международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса»;

– Международная научно-практическая конференция «Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса»;



Рис. 2. На выставке научно-технических разработок в 2016 г.



Рис. 3. На выставке научно-технических разработок молодых ученых в 2018 г.

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



Рис. 4. Разработка студентов Электротехнического факультета ДонНТУ «Робот-рука», 2018 г.



Рис. 5. Выставочная экспозиция «Минералы Донбасса», 2018 г.

– Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых»;

– Международная научно-техническая конференция «Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование»;

– Международная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых».

Следует отметить очень важный фактор влияния подобных мероприятий на совершенство-

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

вание образовательного процесса, как в Донецком национальном техническом университете, так и в других образовательных учреждениях Донецкого региона, на базе которых проводятся мероприятия в рамках форума. Проблема качества подготовки высококвалифицированных кадров и их патриотического воспитания проходит красной нитью через все мероприятия форума [14,15,16].

Привлечение к участию в мероприятиях форума крупных промышленных предприятий региона способствует налаживанию их контактов, как с научной общественностью, так и со студенческой молодежью, которая после окончания обучения пойдет работать на эти предприятия. Работодатели могут присмотреться к будущим работникам, а студенты имеют возможность заявить о себе и показать свои научные (рис. 4 и 5) и творческие таланты, умения и навыки [17,18,19].

По материалам мероприятий форума издаются сборники трудов в электронном и печатном виде, с которыми можно ознакомиться на ряде интернет-платформ в открытом доступе, ссылки на которые приведены на интернет-сайте форума – http://ipd.donntu.org. Материалы форума являются хорошей основой для внедрения в образовательный процесс, развития и совершенствования различных дисциплин [20,21,22], а также перехода к новым формам обучения.

Итоги форума отражаются в Меморандуме, который формируют программные комитеты научных мероприятий.

Проведение форума способствует развитию научного и научно-технического потенциала Донбасса, позволяет продемонстрировать возможности научных организаций и образовательных учреждений региона в сфере создания инноваций и трансфера технологий, а также существующие разработки, которые могут быть востребованы в сфере промышленности и предпринимательства не только Донецкого региона, но и других стран, в первую очередь, Российской Федерации.

Список литературы

1. Онищенко, Р.С. Все так хорошо начиналось: в Донецке собрались … / Р.С. Онищенко, А.Л. Сотников // Металлургические процессы и оборудование. – 2005. – №2. – С. 4-6.
2. Сотников, А.Л. Осенний выставочный марафон // Металлургические процессы и оборудование. – 2006. – №4. – С. 10-11.
3. Сотников, А.Л. Итоги конкурса «Высокие технологии в металлургическом производстве» // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – №2. – С. 6.
4. Еронько, С.П. Роль технических творческих конкурсов в повышении качества образования и трудоустройстве выпускников вузов / С.П. Еронько, А.Л. Сотников, С.И. Аввакумов и др. // Проблеми і перспективи працевлаштування випускників вищих навчальних закладів. Матеріали VI Міжн. наук.-практ. конф. 10 листопада 2011 р. – Донецьк: ДонНУЕТ, 2011. – С. 104-106.
5. Сотников, А.Л. Итоги конкурса «Физическое моделирование и робототехника-2011» / А.Л. Сотников, Н.А. Родионов // Теория механизмов и машин. – 2011. – №2. – Т.9. – С. 90-95.
6. Сидоров, В.А. Об итогах III международной научно-технической конференции «Вибрация машин: измерение, снижение, защита» / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2005. – №2. – С. 3-4.
7. Итоги Международной научно-практической конференции «Практика внедрения передовых технологий эксплуатации и ремонта роторного оборудования металлургических производств» / И.И. Радчик [и др.] // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2011. – №4. – С. 12-24.
8. Пашинский, В.В. Итоги 5-й Международной научно-технической конференции «Металлургические процессы и оборудование» / В.В. Пашинский, С.П. Еронько, А.Л. Сотников // Металлургические процессы и оборудование. – 2013. – №4. – С. 4-6.
9. Сидоров, В.А. Об итогах научно-технического семинара «Вибродиагностика в вопросах обеспечения безопасной эксплуатации промышленного оборудования / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2006. – №2. – С. 8-9.
10. Сидоров, В.А. Итоги II научно-практического семинара «Вибродиагностика промышленного оборудования: современные стационарные и переносные средства диагностирования» / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2007. – №4. – С. 3-4.
11. Аввакумов, С.И. Ассоциация механиков «АссоМ» / С.И. Аввакумов, А.Л. Сотников // Металлургические процессы и оборудование. – 2006. – №2. – С. 12-15.
12. Седуш, В.Я. Ассоциация механиков «АссоМ» как форма взаимодействия высших учебных заведений с промышленными предприятиями / В.Я. Седуш, С.И. Авакумов, А.Л. Сотников // Машиностроение и техно-

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

сфера XXI века. Сб. тр. межд. науч.-техн. конф. 14-19 сентября 2009 г. – Севастополь-Донецк: ДонНТУ, 2009. – В 4 т. – Т.3. – С. 109-112.
13. Лукичев, А.В. Некоторые проблемы инженерного образования в сфере машиностроения на рубеже тысячелетий / А.В. Лукичев, А.Л. Сотников // Машинознавство. Матеріали 2-ої регіональної наук.-метод. конф. – Донецьк: ДонГТУ, 2000. – С. 96-97.
14. Сотников, А.Л. Новые формы инженерного образования // Проблема цілісного розвитку особистості студена як суб'єкта педагогічної взаємодії (глобальні і регіональної тенденції). Матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф. 2-3 червня 2004. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – С. 161-163.
15. Еронько, С.П. Новые подходы к организации технической подготовки инженеров-механиков / С.П. Еронько, А.Л. Сотников // Інженерна освіта у розвитку сучасного суспільства: Матеріали міжн. наук.-практ. конф., м. Донецьк, 30 травня – 01 червня 2011 р. – Донецьк: ДонНТУ Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, 2011. – С. 20-23.
16. Аввакумов, С.И. Опыт сотрудничества с работодателями на механическом факультете ДонНТУ / С.И. Аввакумов, А.Л. Сотников // Проблеми і перспективи працевлаштування випускників вищих навчальних закладів. Матеріали 2-ої Всеукраїнської наук.-практ. конф. 14 листопада 2007. – Донецьк: ДонНУЕТ, 2007. – С. 162-165.
17. Опыт альтернативной практической подготовки студентов-механиков в ДонНТУ / С.П. Еронько, А.Л. Сотников, В.А. Булахов и др. // Проблеми і перспективи працевлаштування випускників вищих навчальних закладів. Матеріали 4-ої Міжн. наук.-практ. конф. 10 листопада 2009. – Донецьк: ДонНУЕТ, 2009. – С. 245-248.
18. Еронько, С.П. Альтернативная практическая подготовка студентов-механиков в Донецком национальном техническом университете / С.П. Еронько, А.Л. Сотников, В.А. Булахов и др. // Университетский образовательный округ: от школы к бизнес-сообществу путем инноваций. 80 лет УГЛТУ – опыт высшего лесотехнического образования на Урале. Материалы межд. науч.-метод. конф. 26-27 мая 2010 г. – Екатеринбург: Уральск. гос. лесотехн. ун-т, 2010. – С. 205-208.
19. Онищенко, В.П. Состояние и перспективы развития учебной дисциплины «Теория механизмов и машин» в Донецком национальном техническом университете / В.П. Онищенко, А.Л. Сотников // Теория механизмов и машин. – 2010. – №2. – Т.8. – С. 80-84.
20. Шоломицкий, А.А. Перспективы развития дисциплины «Начертательная геометрия» / А.А. Шоломицкий, А.Л. Сотников, С.П. Писанка // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 3-й Межд. науч.-практ. конф. 20-21 июня 2013. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 179-184.
21. Сотников, А.Л. Изучение методов тензометрии в рамках лабораторных работ по дисциплине «Динамика и прочность металлургических машин» / А.Л. Сотников, Н.А. Родионов // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих. Зб. наук. пр. XIV наук.-тех. конф. аспірантів та студентів в м. Донецьку 22-24 квітня 2014 р. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. – С. 309-312.
22. Сотников, А.Л. Особенности дистанционного обучения / А.Л. Сотников, И.Ф. Муханова // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2018. – №3. – С. 3-8.

Сведения об авторах

Ю.А. Стольная
SPIN-код: 8826-8880
Телефон: +380 (71) 321-17-04
Эл. почта: stolnaya_yulia@mail.ru

М.Ю. Пахомов
SPIN-код: 9865-9200
Телефон: +380 (71) 346-65-60
Эл. почта: mixa133@mail.ru

Е.Д. Топалов
SPIN-код: 5301-8856
Телефон: +380 (71) 332-54-92
Эл. почта: my.bender@mail.ru

Статья поступила 04.12.2018 г.
© Ю.А. Стольная, Е.Д. Топалов, М.Ю. Пахомов, 2018

УДК 539.3

Л.П. Вовк /д.т.н./, Е.С. Кисель
Автомобильно-дорожный институт
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Горловка)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИНЫ С ТРЕЩИНОЙ ПРИ НАЛИЧИИ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Разработан конечно-элементный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния детали с дефектом, включающий в себя исследование характеристик разрушения в зависимости от дефекта. Отдельно проанализированы прочностные изменения в детали при наличии разгружающих отверстий.

Ключевые слова: *механика разрушения, коэффициент интенсивности напряжений, трещина, трещиноподобный дефект, J-интеграл.*

Постановка проблемы

В инженерных расчетах на прочность, при анализе причин и характера разрушения объектов сложных технических систем традиционно рассматриваются фактор наличия трещин и трещиноподобных дефектов. Так как подобного рода дефекты можно наблюдать практически во всех автомобильных конструкциях, то, независимо от причин их происхождения, при конструкционном инжиниринге, стало естественным учитывать возможность разрушения объекта в результате образования и роста трещин. Для многих деталей автомобилей и инженерных конструкций, имеющих различные поверхностные трещиноподобные дефекты технологического, металлургического или эксплуатационного происхождения, прочность и перспективная долговечность изделия будет определяться временем достижения возникающей микротрещины критических размеров. Для оценивания растущей трещины вычисляется коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Поскольку напряженное состояние у фронта трещины для упругого тела полностью определяется коэффициентом интенсивности напряжений K_I, эта величина лежит в основе силовых критериев линейной механики разрушения. Одним из наиболее распространенных методов прогнозирования появления и развития трещиноподобных дефектов является метод конечных элементов (МКЭ). Использование такого метода возможно при линейно-упругом поведении материала и наличии сингулярности напряжений у вершины трещины. На практике, ввиду отсутствия нормативных документов, учитывающих современное состояние проблемы и сложное прогнозирование рассматриваемых процессов, к сожалению, часто применяется экспертный подход к определению возможности дальнейшей эксплуатации объекта с дефектами. Это означает, что эксперт в условиях отсутствия у него объективных данных о реальном уровне безопасности и надежности конструкции и, исходя из своего опыта, принимает решение о необходимости ремонта или продолжении эксплуатации без реализации дополнительных превентивных мер. Естественно, что при таком подходе велика вероятность принятия ошибочного решения, т.к. его основой является субъективное мнение. Учитывая запросы современного диагностического обеспечения крупных промышленных объектов, вопрос исследования развития трещиноподобных дефектов приобретает особую актуальность.

Анализ последних исследований и публикаций

В большей части публикаций, рассматривающих данный вопрос, принято считать, что металл стыковых (сварных) соединений лишен дефектов сплошности, чего на практике практически невозможно достичь. Для реальных изделий наличие, например, в сварных швах твердых и газовых включений вполне возможно, что значительно осложняет прогнозирование развития разрушения. Причины нарушения сплошности стыковых соединений, в частности металлических швов, достаточно подробно изложены в [1…3]. В данных работах рассматриваются различные факторы технологического, металлургического и организационного характера и их влияние на прочностные характеристики объекта. Поскольку в отношении дефектов сварных со-

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

единений можно говорить об определенной их неизбежности, в соответствующих нормативных документах установлены допуски на максимальный размер дефектов для различных конструкций. Однако, как показал анализ публикаций [4…6], в действительности при диагностическом обследовании уже эксплуатируемых объектов нередки случаи выявления в шве дефектов размерами выше нормативно допустимых.

Для вычисления КИН, как правило, используется метод конечных элементов (МКЭ) [6]. Обзор исследований, посвященных конечно-элементному моделированию раскрытия трещины, а также влиянию типа элементов, подробности сетки, принятой модели упрочнения, вида плоского напряженно-деформированного состояния и способа освобождения узлов, представлен в работе [4].

Для современной инженерной практики представляют интерес закономерности распространения сквозных трещин усталости, развивающихся при плоском напряженном состоянии или плоской деформации, на основании испытаний на образцах в виде пластин с различными концентраторами напряжений – отверстиями и надрезами, а также упрочняющими включениями различной формы и размеров из других материалов.

Введение в рассмотрение концентраторов напряжения обусловлено необходимостью получения качественно нового эффекта – стабилизации трещины. Конструкционное торможение трещины предполагается возможным путем добавления разгружающих отверстий, ремонтных заплат различной конфигурации, ребер жесткости, приваренных, приклеенных или приклепанных к конструкции. Задачи поиска оптимальных форм отверстий в общем случае сводятся к решению вариационных задач с неизвестными границами. В некоторых случаях для определения формы отверстий, на которых технологически неизбежная концентрация была бы сведена к минимуму по сравнению со всеми другими возможными формами отверстий, рассматриваются задачи теории упругости с неизвестной границей. Обзор работ по определению равнопрочных отверстий приведен в статье Г.П. Черепанова [7].

Следует заметить, что предельные значения K_{IC} (вязкости разрушения) и J-интеграла довольно чувствительны к небольшим вариациям химического состава и фазовой структуры материала, технологии производства, а в случае сварного шва – всех параметров сварочного процесса и последующей технологической обработки, а также истории эксплуатации конструкции. На данный момент нет общих справочников по значениям K_{IC} и J-интеграла. Наиболее активно используемым является справочник по КИН [8]. Однако существующие в отрасли нормы и правила обеспечения надежности объектов, как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации, основанные на нормативном методе расчета конструкции по предельным состояниям, реализуются за счет применения зачастую неоправданных коэффициентов запаса прочности, что приводит к существенному увеличению металлоемкости. Для серьезных исследований критические значения определяются из стандартных опытов. Поэтому разработка методов конструкционного торможения трещин, позволяющих получать численные значения параметров разрушения, является актуальной задачей.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является конечно-элементное моделирование процесса упругопластического деформирования прямоугольной пластины с трещиной, определение параметров ее разрушения. В исследуемой модели обязательным условием стал учет и сравнение сингулярности напряжений у вершины трещины при наличии концентраторов напряжения различной конфигурации.

Основной материал исследования

Если рассматривается процесс плоской деформации, КИН, как правило, снабжают индексом I, что соответствует раскрытию трещины по нормальному типу. Наряду с КИН, в качестве параметров механики разрушения, связанных с ростом трещин, используются скорость высвобождения энергии и J-интеграл. В линейной постановке энергия и J-интеграл тождественны и связаны с КИН простыми зависимостями, поэтому КИН обычно используют для описания роста трещин.

Поле напряжений перед вершиной трещины имеет признаки особенности (сингулярности), суть которой в том, что компоненты напряжений перед вершиной трещины обратно пропорциональны корню из расстояния от ее вершины. Поэтому для моделирования такого поля и вычисления значений КИН, логически верным было бы окружить вершину трещины сингулярными элементами. Они должны представлять собой изопараметрические элементы, в которых промежуточные узлы на двух сторонах сдвинуты на грани в направлении вершины трещины. Именно такие элементы будут способны описать тот всплеск напряжений, который наблюдается в вершине трещины.

При использовании МКЭ для моделирования

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

раскрытия трещины с учетом упругопластического деформирования следует проанализировать контактные напряжения или перемещения в узлах, ближайших к вершине трещины (первый и второй узлы берегов трещины за ее вершиной), напряжения в вершине трещины и оценить общую податливость.

Исходные данные: прямоугольная пластина длиной 0,4 м и шириной 0,1 м с трещиной без концентраторов напряжения (рис. 1а) и с двумя отверстиями радиусом 0,01 м растягивается напряжением 1 МПа. Рассмотрены полые отверстия и отверстия, заполненные материалами с различной жесткостью (сталь, свинец, титан). В соответствии с критерием Иоффе, траектория магистральной трещины развивается в направлении плоскости действия максимальных растягивающих главных напряжений, т.е. трещина в процессе роста стремится ориентироваться в поле напряжений так, чтобы отсутствовал сдвиг образующих ее берегов.

Расположение трещины перпендикулярно действию растягивающей нагрузки; расстояние между центрами отверстий 0,38 м (рис. 1б, в). Длина трещины a изменяется, последовательно увеличиваясь от 0,12 м до 0,285 м. Материал пластины – сталь с характеристиками: E=1,9·10^{11} Па – модуль сдвига; ν=0,29 – коэффициент Пуассона; вязкость разрушения K_{IC}=537,6 Н/мм$^{3/2}$.

В качестве допущения примем, что имеет место плоская деформация.

В связи с этим представляет интерес исследование напряженно-деформированного состояния пластины; вычисление коэффициента интенсивности напряжений и J-интеграла. Наличие двойной симметрии в этой задаче позволяет ограничиться рассмотрением лишь одной четверти пластины, закрепив ее подходящим образом в узлах, расположенных на осях симметрии. Начало системы координат поместим в левый нижний угол четверти детали и будем исследовать часть пластины, лежащую в первом квадранте (рис. 2а).

Проведем цикл расчетов, предполагающий увеличение длины трещины, путем последовательного приближения вершин трещины к разгружающим отверстиям (или стопперам) от 0,09 м до 0,005 м, считая от вершины трещины до края разгружающего отверстия. Реализацию алгоритма расчета рассмотрим на примере детали с разгружающими отверстиями. Расстояние от вершины трещины до отверстия 0,01 м.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия. Запустим пакет ANSYS, установим тип используемых в расчете конечных элементов – 8-узловой плоский элемент PLANE183 с формулировкой «плоская деформация». Задаем свойства материала.

Строим геометрическую модель четверти пластины. В вершине трещины назначим точку (ключевую точку *KPs*) концентрации напряжений: M_M>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls> >Concentrat KPs>Create. Указываем вершину трещины.

Разбиваем область на конечные элементы. Предупреждение о том, что в модели присутствуют элементы со смещенными промежуточными узлами, следует проигнорировать. Получаемая при этом разбивка показана на рис. 2б. Сингулярные элементы в вершине трещины хорошо видны при масштабировании (рис. 2в).

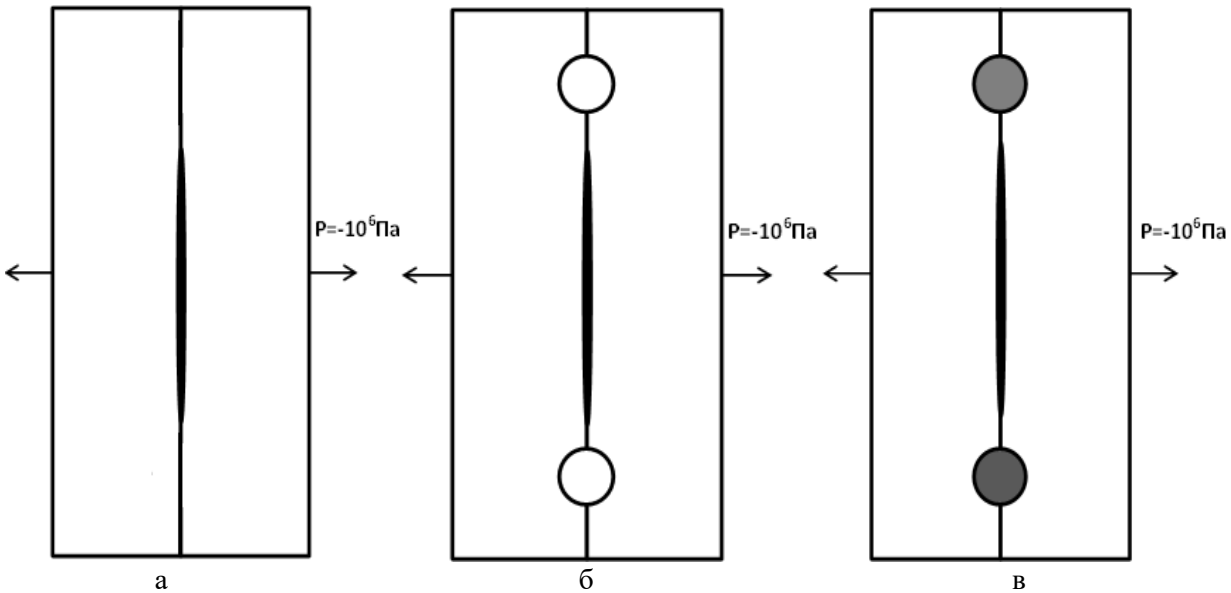
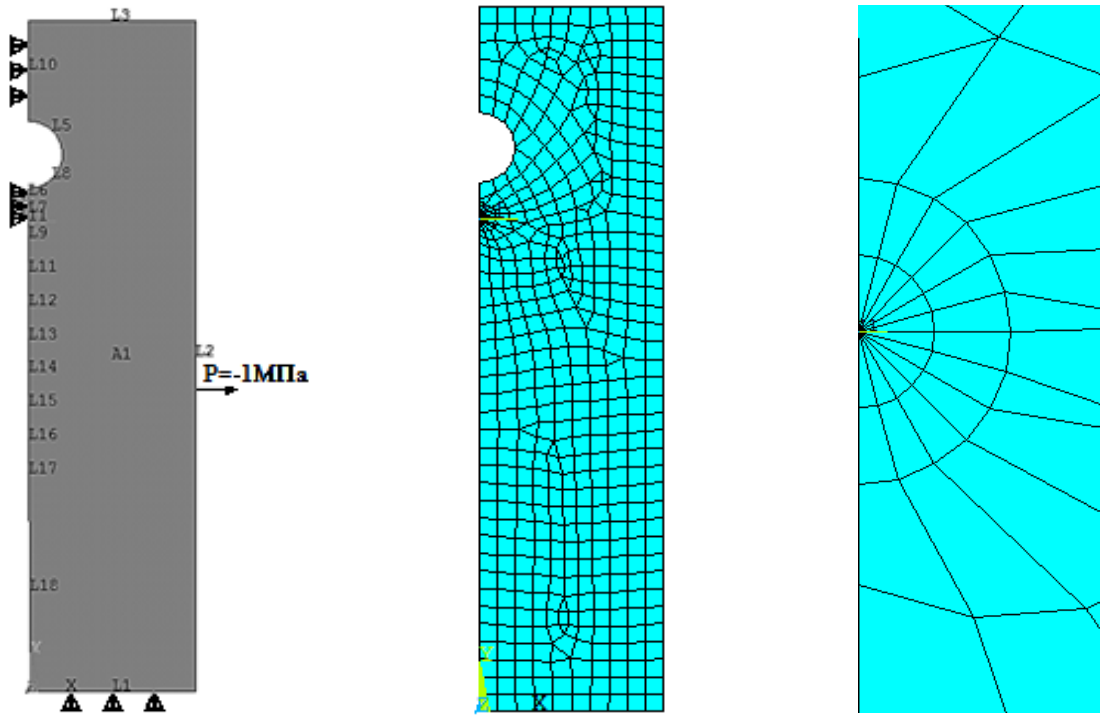


Рис. 1. Исследуемая деталь:
а – с трещиной; *б* – с разгружающими отверстиями; *в* – с применением стопперов

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



а б в

Рис. 2. Четверть исследуемой детали:
а – приложение нагрузки; *б* – КЭ сетка;
в – масштаб КЭ сетки в вершине трещины, сингулярные элементы

Для удобства выполнения следующей операции отображаем на экране линии: U_M>Plot> >Lines.

Задаем граничные условия симметрии: M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural> >Displacement>On Lines. Указываем лежащие на вертикальной оси симметрии линии, (линию, представляющую поверхность трещины, не указываем). В списке DOFs to be constrained выбираем UX. Указываем лежащую на горизонтальной оси симметрии линию. В списке DOFs to be constrained выбираем UY.

Далее следует последовательно приложить необходимую нагрузку: M_M>Solution> Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Lines. Выбираем внешние вертикальные границы прямоугольной области. В поле Value Load PRES value для задания растягивающей нагрузки вводим отрицательное значение -1 МПа. Запишем в компонент CRACK узел в вершине трещины. В поле Component name вводим метку CRACK, а в списке Component is made of выбираем строку Nodes. Инициализируем вычисление *J*-интеграла. Для этого в строке ввода команд, не выходя из модуля Solution, с помощью клавиатуры введем следующие команды:

CINT, NEW, 1! Определение уникального номера трещины =1;

CINT, CTNC, CRACK! Указание узла вершины трещины;

CINT, NCON, 4! Задание числа контуров интегрирования;

CINT, SYMM, ON! Включение условия симметрии для трещины;

CINT, NORM, 0, 1! Определение нормали к плоскости трещины, плоскость трещины перпендикулярна оси OX (ось 1) глобальной декартовой системы координат (с номером 0).

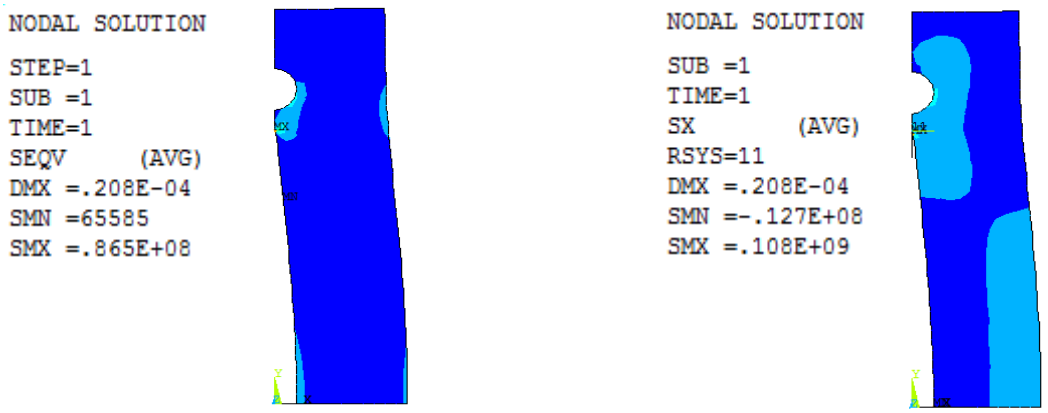
Вернем все объекты модели в активный набор: U_M>Select>Everything. Запустим задачу на счет: M_M>Solution>Solve>Current LS. Сообщение о присутствии элементов со смещенными промежуточными узлами закрываем. Заходим в модуль General Postprocessor и отображаем на экране поле напряжений по Мизесу и нормальные напряжения (рис. 3а, б).

Для отображения результатов на полной модели воспользуемся командой U_M> PlotCtrls> >Style>Symmetry Expansion>Periodic/Cyclic Symmetry. Выбираем опцию 1/4 Dihedral Sym (рис. 4а, б).

Для возвращения к расчетной модели следует выполнить предыдущую команду и выбрать опцию No Expansion.

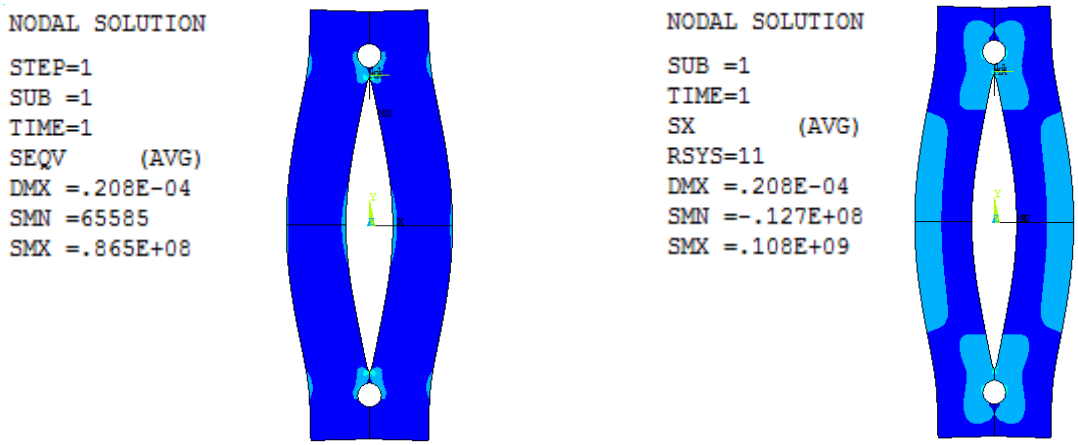
Выведем на экран список значений *J*-интеграла для всех заданных контуров интегрирования (размерность Н/мм=кДж/м^2). Не выходя из модуля General Postprocessor, в строке ввода команд набираем: PRCINT, 1! 1 – идентификационный номер трещины.

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



а б

Рис. 3. Четверть исследуемой детали:
а – напряжения по Мизесу; *б* – нормальные напряжения



а б

Рис. 4. Исследуемая деталь:
а – напряжения по Мизесу; *б* – нормальные напряжения

После нажатия клавиши Enter на экране дисплея в отдельном текстовом окне появится список рассчитанных значений *J*-интеграла в Н/м по всем требуемым четырем контурам: Contour Values=75,736; 75,59; 75,771; 75,743. Здесь числовые значения определяют спецификацию контуров по мере удаления от вершины трещины. Значение *J*-интеграла по первому контуру, охватывающему первый ряд примыкающих к вершине трещины элементов, получается менее точным. Последний контур при используемой сетке элементов не достигает внешней границы, что не вносит погрешности в вычисления.

Значения демонстрируют хорошую инвариантность, т.е. независимость от выбора контура интегрирования. Значит, в качестве среднего значения *J*-интеграла можно принять 75,743 Н/м.

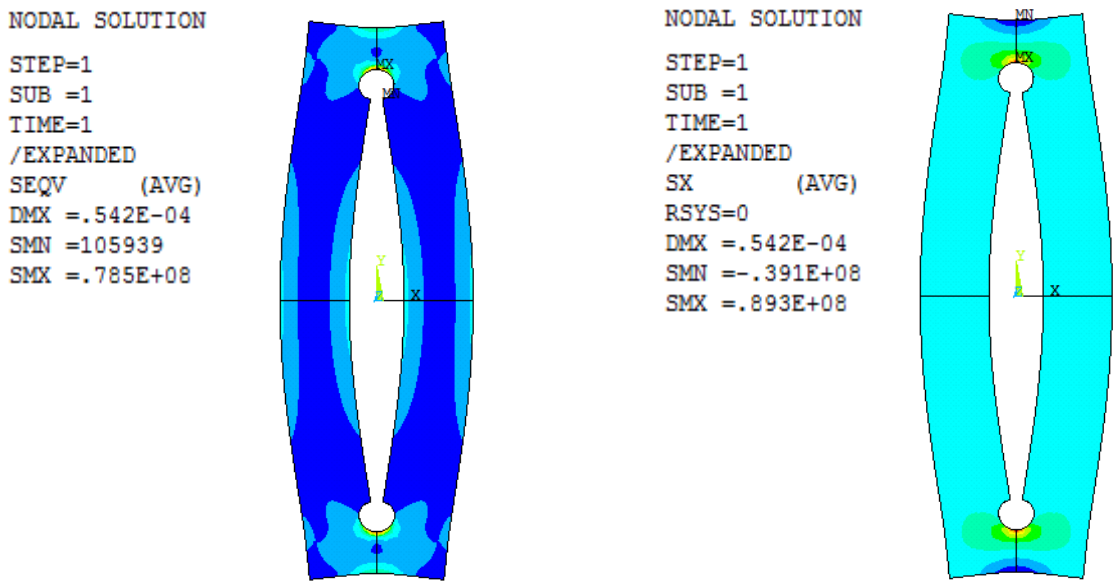
Вычислим коэффициент интенсивности напряжений K_I. Для этого определим локальную систему координат в вершине трещины по трем узлам, затем зададим траекторию вдоль поверхности трещины по трем узлам.

Выведем на экран значения коэффициентов интенсивности напряжений: M_M>General Postproc>Nodal Calcs>Stress Int Factr. В списке Disp extrapolat based on (модель аппроксимации перемещений) выбираем значение Plane Strain (плоская деформация); в поле Model type (тип модели трещины) указываем Half–symm b.c. (модель половины трещины с граничными условиями симметрии). При этом появляется текстовое окно, где содержится сводная информация по трещине и представлены значения коэффициентов интенсивности напряжений K_I, K_{II} и K_{III} (размерность Н/м$^{3/2}$), K_I=3,9635E+06.

По предложенному алгоритму проведем цикл расчетов для модели с разгружающими отверстиями**,** выполненными вдоль вертикальной оси симметрии на некотором расстоянии от вершины трещины. Количество расчетов соответствует количеству ключевых точек – концентраторов напряжения, предварительно созданных на модели. Такие отверстия не вносят нежелательный эксцентриситет, более просты в исполнении и не требуют дополнительных затрат материала.

Дополнительно была построена и исследована деталь после входа трещины в отверстие (рис. 5а, б).

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



а б

Рис. 5. Вход трещины:
а – напряжения по Мизесу; *б* – нормальные напряжения

Анализируя данные рис. 5…7, можно отметить следующее влияние разгружающих отверстий на развитие усталостных трещин: если на пути развивающейся усталостной трещины встречается круглое отверстие, то отмечается тормозящий эффект этого отверстия. Это происходит за счет существенного уменьшения концентрации напряжений (см. рис. 5а, б), проявляющийся после входа в него трещины. Однако он практически полностью компенсируется ускорением роста трещины при ее приближении к отверстию за счет увеличения коэффициента интенсивности напряжений (рис. 6) и увеличением размера повреждения за счет присоединения к повреждению самого отверстия (см. рис. 5а, б). Следует отметить, что для расчетной модели, представленной на рис. 5а, б, алгоритм расчета КИН неприменим, поэтому вычисления проводились для сплошного тела с полостью.

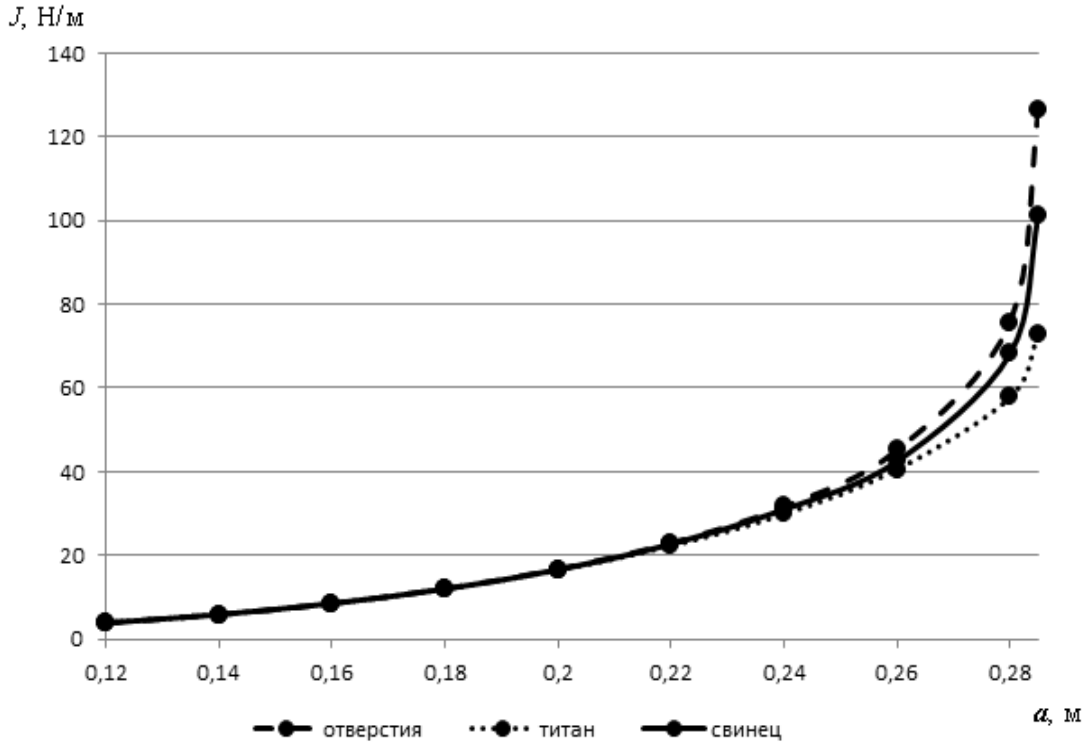


Рис. 6. Изменение значения *J*-интеграла при увеличении длины трещины

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

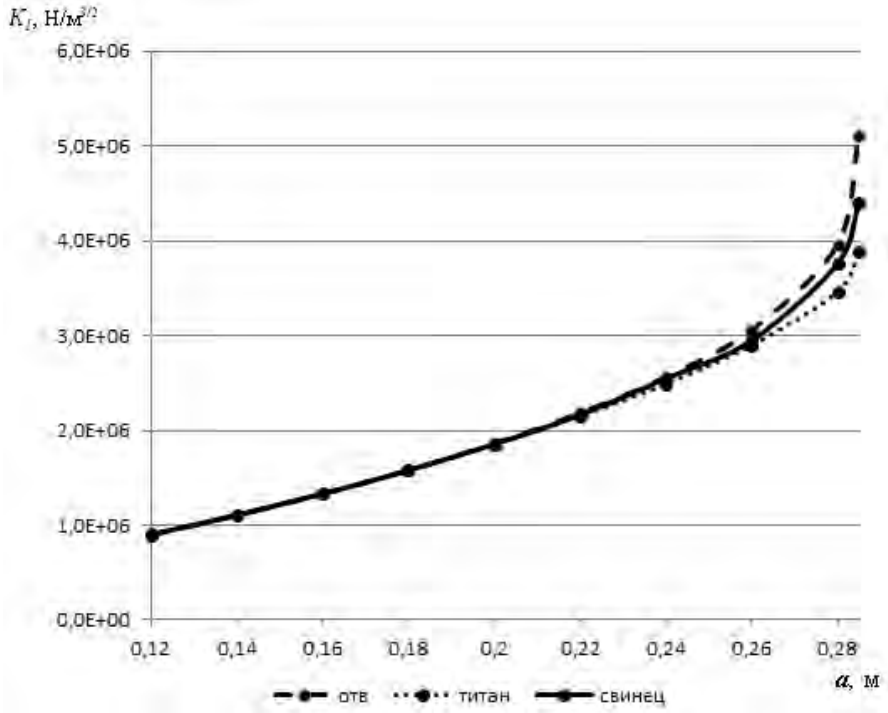


Рис. 7. Изменение значения K_I при увеличении длины трещины

Сравнивая воздействие разгружающих отверстий и близлежащих к вершине трещины заплат на ее развитие, можно заметить, что использование заплат не приводит к существенной стабилизации трещины, однако снижает значения K_I и J-интеграла. Причем тем сильнее, чем более жесткий материал использовался в качестве заплаты. Т.е. преобладающая жесткость материала заплаты может считаться одним из основных факторов, влияющих на коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины (см. рис. 6, 7).

Очевидно, что заплаты следует устанавливать симметрично с обеих сторон листа, иначе могут появиться изгибные напряжения, которые снизят и даже совсем ликвидируют подкрепляющий эффект заплаты [9,10]. Таким образом, наличие препятствий в виде более жестких заплат снижает значения K_I, что позволяет увеличить значение предельной нагрузки, в результате чего трещина остается устойчивой в более широком диапазоне нагрузок.

Выводы

Одной из важнейших прикладных областей, где могут быть применены приведенные результаты, является управление поведением трещины. Сущность подобного управления заключается в принятии определенных проектно-конструкторских решений с целью уменьшения скорости роста уже существующих трещин или недопущения появления новых. Присутствие устойчивых трещин в конструкциях, работающих при определенных режимах нагружения, намного менее опасно, а искусственное усиление таких конструкций существенно повышает их ресурс.

Представляет интерес дополнительное исследование влияния формы и размеров заплат и разгружающих отверстий, моделирование ребер жесткости и их влияние на распространение трещины, учет пластичности при проведении расчетов. Также представляется важным исследование взаимного геометрического расположения разгружающих элементов модели и трещин и использование оптимизационных возможностей программного комплекса ANSYS.

Список литературы

1. Судакова, К.Ю. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции / К.Ю. Судакова, И.Л. Казюкевич // В мире неразрушающего контроля. – 2004. – №3. – С. 8-10.
2. Мясникова, А.А. Неметаллические включения и их влияние на качество сварных соединений при ручной дуговой сварке / Master's Journal. – 2012. – №1. – С. 50-54.
3. Zhiyong, L. Detection of GTA welding quality and disturbance factors with spectral signal of arc light / Journal of materials processing technology. – 2009. – Vol.209. – No.10. – P. 4867-4873.
4. Королев, И.К. Численное моделирование накопления повреждений и развития усталостной трещины в упругих материалах / И.К. Королев, С.В. Петинов, А.Б. Фрейдин // Вычисл.

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

мех. спл. сред. – 2009. – №3. – Т.2. – С. 34-43.
5. Емельянов, О.В. Совершенствование определения коэффициента интенсивности напряжений методом малобазной тензометрии / О.В. Емельянов, А.Н. Шувалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2015. – №3. – Т.15. – С. 32-37.
6. Sarzosa, D.F.B. Fatigue crack growth assessments in welded components including crack closure effects: Experiments and 3-D numerical modeling / D.F.B. Sarzosa, L.B. Godefroid, C. Ruggieri // Int. J. Fatigue. – 2013. – Vol.47. – P. 279-291.
7. Черепанов, Г.П. Обратная упругопластическая задача в условиях плоской деформации / Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – 1963. – №2. – С. 57-60.
8. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – Т.2. – 1013 с.
9. Singh, K.D. A short summary on finite element modelling of fatigue crack closure / K.D. Singh, M.R. Parry, I. Sinclair // J. Mech. Sci. Technol. – 2011. – No.12. – Vol.25. – P. 3015-3024.
10. Сибгатуллин, Э.С. О тензоре коэффициентов интенсивности напряжений и критериях разрушения в механике трещин // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – №2. – С. 56-60.

L.P. Vovk /Dr. Sci. (Eng.)/, E.S. Kisel
Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University (Gorlovka)

DETERMINATION OF FRACTURE PARAMETERS OF THE CRACKED PLATE WITH STRESS CONCENTRATORS IN THE PROCESS OF ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION

Background. *Defects divided into two classes according to the effect on the stress-strain state of structures: classic defects are defects with a finite radius of curvature at the top, and cracks or crack-like defects. Crack-like defects are the most dangerous. Crack-like defects have a sharp apex with almost zero radii. The main parameter characterizing the level of stress concentration of such defects is the stress intensity factor. Assessment of the impact of defects on the mechanical and operational properties of the object of control by conducting destructive tests is not always profitable from the economic point of view. Therefore, currently at the stage of engineering product design methods of linear fracture mechanics widely used to assess the performance and period of operation of the most important parts with crack-like defects.*

Materials and/or methods*. The methodological importance of this study is to develop an algorithm for solving the problem of calculating the stress-strain state of parts with a defect, including the study of fracture characteristics depending on the defect. Practical interest is the question of assessing the stress changes in the parts with unloading holes. The calculation of fracture toughness based on the force fracture criterion by Irvine used when building an algorithm. Calculation of the maximum stress intensity factor along the crack front carried out using the method of finite elements in the ANSYS software package. 8-node plane elements used to create a finite element model with a crack, and special singular finite elements used to describe the features along the crack front,*

Results. *The given algorithm allows calculating such strength characteristics of the control object as the values of the J-integral. The addition of unloading holes and patches close to the crack top allowed assessing their impact on the crack not leading to significant stabilization but reducing the value of the J-integral.*

Conclusion. *Thus, the obstacles in the form of stiffer patches reduce the values and allow increasing the limit load, and as a result, the crack remains stable in a larger range of loads.*

Keywords: *fracture mechanics, stress intensity factor, crack, crack-like defect, J-integral.*

Сведения об авторах

Л.П. Вовк
SPIN-код: 9860-6682
Телефон: +380 (71) 301-98-55
Эл. почта: lv777@list.ru

Е.С. Кисель
SPIN-код: 7676-8943
Телефон: +380 (71) 443-74-77
Эл. почта: e.s.kisel@gmail.com

Статья поступила 06.11.2018 г.
© Л.П. Вовк, Е.С. Кисель, 2018
Рецензент д.т.н., проф. В.Г. Артюх

УДК 622.223.83

Н.Г. Афендиков /к.т.н./, А.В. Шендрик, К.Б. Ломаковский
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ СО СТРЕЛОВИДНЫМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ОРГАНАМИ

Рассмотрены вопросы возможности использования системного подхода и системного анализа для повышения надежности проходческих комбайнов избирательного действия. Выполнена декомпозиция проходческого комбайна на системы, на подсистемы, на узлы, составляющие подсистемы. Поставлена задача разработки мероприятий по техническому обслуживанию комбайнов и текущим ремонтам.

Ключевые слова: *системный подход, проходческий комбайн, декомпозиция, системы, подсистемы, узлы, техническое обслуживание, ремонты.*

Постановка проблемы

При повышении надежности проходческих комбайнов улучшается их использование во времени, т.к. сокращаются простои оборудования всего проходческого комплекса проходческого участка из-за отказов, приводящих к потерям рабочего времени, необходимого для производства ремонтов, и, кроме этого, к потерям рабочего времени, необходимого для производства технического и профилактического обслуживания. Необходимость производства ремонтов и обслуживания приводит к значительным экономическим потерям во время эксплуатации оборудования.

В процессе эксплуатации проходческие комбайны со стреловидными исполнительными органами подвергаются механическим, термическим, вибрационным, химическим воздействиям и другим видам нагрузок, которые носят случайный динамический характер и под воздействием которых в материалах конструкций накапливаются усталостные повреждения, приводящие к их структурным изменениям. При этом происходит также абразивный износ сопрягаемых деталей и узлов. Различные неблагоприятные условия работы проходческих комбайнов в виде повышенной влажности воздуха в проходческом забое, кислотных и щелочных воздействий в ходе эксплуатации, которые обусловлены наличием кислот и щелочей в шахтных водах, приводят к коррозионному повреждению поверхностей машин и их защитных покрытий, а также к другим изменениям состояния узлов и деталей комбайнов.

В конструкции проходческих комбайнов входят различные блоки: механические, гидравлические, электрические, блоки управления и др. [1], т.е. комбайны можно рассматривать как технические устройства, которые имеют признаки систем, таких как целенаправленность, наличие иерархии, множества входов и выходов, взаимодействие элементов, связь между элементами, оценка результатов эксплуатации, принятие конструктивных и управленческих решений, изменение состояний. Все это обуславливает применение системного подхода при решении практических задач по повышению надежности проходческих комбайнов вместе со всем набором средств теории систем: вычислительной техники, теории вероятностей и математической статистики, теории информации, теории игр и решений, теории графов и сетей, факторного анализа, теории операций, экспертных оценок, эргономики, системотехники, теории множеств и теории оптимизации [2].

Системный подход позволяет учесть такие факторы, как случайность событий, конфликтность конструктивных решений, неоднозначность состояния сложных объектов, автоматическое действие средств защиты и управления, и определяет по существу комплексный подход к проблеме повышения надежности как самих проходческих комбайнов, так и проходческих комплексов проходческих забоев.

Анализ последних исследований и публикаций

Системный подход – это подход, при котором любая система (объект) рассматривается как совокупность взаимосвязанных элементов (компонентов), имеющая выход (цель), вход (ресурсы), связь с внешней средой, обратную связь [3…5]. Это подход к исследованию процессов, происхо-

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

дящих в природе, в обществе, в сложных технических устройствах [6…8]. В общем случае под системой понимается целостное множество объектов, связанных между собой взаимными отношениями. Его сущность состоит в реализации требований общей теории систем, согласно которой каждый объект в процессе его исследования должен рассматриваться как система и одновременно как элемент более общей системы [9].

Как известно, системный подход при исследовании, разработке, модернизации и проектировании технических объектов (машин, комплексов машин) называют системотехникой [3]. Согласно теории системного анализа в технике (системотехники) создается абстрактная и концептуальная система, описываемая с помощью символов или других средств, представляющая собой определенное структурно-логическое устройство, цель которого – служить инструментом понимания, описания и, возможно, более полной оптимизации поведения связей и отношений элементов реальной системы. Здесь термин «анализ» используется для характеристики самой процедуры проведения исследования, которая состоит в том, чтобы разделить проблему на составляющие части, более доступные для решения, использовать наиболее подходящие специальные методы для построения отдельных подпроблем, объединить их так, чтобы найти оптимальное решение.

Системный подход [2,10,11] ориентирует исследователей на раскрытие целостности объекта, на выявление многообразных связей и сведение их в единую теоретическую картину.

При исследовании любого объекта или явления необходим системный подход, который возможно представить в виде последовательности следующих этапов: выделение объекта исследования из общей массы явлений, объектов; составление математической модели системы; выбор критериев оптимизации решаемой задачи; решение задачи.

В работах кафедры «Горные машины» Донецкого национального технического университета широко использовался системный анализ и системный подход как в учебном процессе [1], так и при проведении научно-исследовательских работ [12,13].

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является установление возможности применения методов системного подхода и системного анализа для повышения надежности проходческих комбайнов избирательного действия со стреловидными исполнительными органами.

Основной материал исследования

Современный проходческий комбайн – сложная машина [1], состоящая из примерно 5 тыс. деталей, в том числе в гидравлическом приводе комбайна около 2 тыс. деталей. Поэтому проходческий комбайн необходимо рассматривать как техническую систему, которая состоит из совокупности технических узлов, устройств управления и контроля (элементов), предназначенных для выполнения определенных функций. При этом элементы – составные части системы (рис. 1). Рассматриваемый проходческий комбайн избирательного действия со стреловидным исполнительным органом – сложная система, состоящая из: исполнительного органа 1; гидроцилиндров телескопа исполнительного органа на забой 2; привода исполнительного органа 3; гидроцилиндров подъема исполнительного органа 4; гидроцилиндров поворота исполнительного органа 5; насосной станции 6; конвейера 7; опорных гидроцилиндров 8; гусеничных ходовых частей 9; гидроцилиндров подъема-опускания стола питателя 10; нагребающих лап (звезд) 11; стола питателя 12, а также других узлов и деталей.

К уровню общей (главной) цели относится сама система (надсистема) проходческого комбайна (ПК), включающая следующие составные части первого уровня: A^1_1 – гидравлическую систему комбайна (ГСК) и B^1_1 – механическую систему комбайна (МСК).

Гидравлическая система на втором уровне включает следующие подсистемы:

– A^2_1 – гидропривод поворота исполнительного органа (ГПрИО);

– A^2_2 – гидропривод подъема исполнительного органа (ГПдИО);

– A^2_3 – гидропривод телескопа исполнительного органа (ГТИО);

– A^2_4 – гидропривод нагребающих лап (ГНЛ) или звезд;

– A^2_5 – гидропривод подъема-опускания стола питателя (ГПОСП);

– A^2_6 – гидропривод хода правый (ГХП);

– A^2_7 – гидропривод хода левый (ГХЛ);

– A^2_8 – гидропривод опор (ГО);

– A^2_9 – насосную станцию (НС).

Механическая система на втором уровне включает следующие подсистемы:

– B^2_1 – привод исполнительного органа (ПИО);

– B^2_2 – исполнительный орган (ИО);

– B^2_3 – конвейер (К);

– B^2_4 – механическую составляющую правой ходовой части (МПХЧ);

– B^2_5 – механическую составляющую левой ходовой части (МЛХЧ);

– турель (Т).

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

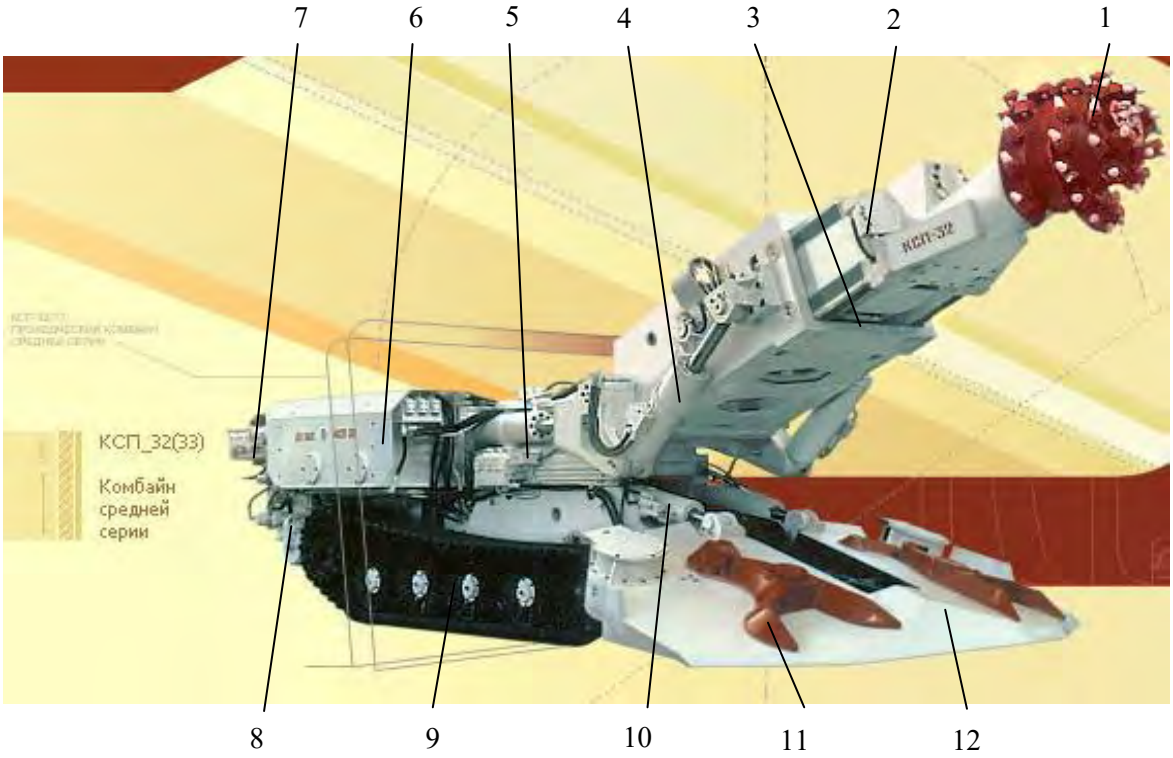


Рис. 1. Проходческий комбайн типа КСП-32

Кроме этого, исполнение комбайна -02 имеет гидроцилиндры подъема и поворота конвейера, а к комбайнам исполнения -00 и -01 по желанию заказчика могут поставляться перегружатели.

Одной из основных процедур системного анализа применительно к системе проходческого комбайна следует считать изучение структуры системы, анализ ее компонентов, выявление взаимосвязей между отдельными элементами. На рис. 2 приведена структурная схема проходческого комбайна КСП-32.

К третьему уровню относятся составляющие элементы подсистемы гидравлической системы:

– ГПрИО включают в себя: A^3_1 – гидравлические коммуникации ($ГК_1$), A^3_2 – распределители ($РП_2$), A^3_3 – гидрозамки ($ГЗ_3$), A^3_4 – гидроцилиндры ($ГЦ_4$);

– ГПдИО включают в себя: A^3_5 – гидравлические коммуникации ($ГК_5$), A^3_6 – распределители ($РП_6$), A^3_7 – гидрозамки ($ГЗ_7$), A^3_8 – гидроцилиндры ($ГЦ_8$);

– ГТИО включают в себя: A^3_9 – гидравлические коммуникации ($ГК_9$), A^3_{10} – распределители ($ГР_{10}$), A^3_{11} – гидрозамки ($ГЗ_{11}$), A^3_{12} – гидроцилиндры ($ГЦ_{12}$);

– ГНЛ включают в себя: A^3_{13} – гидравлические коммуникации ($ГК_{13}$), A^3_{14} – распределители ($ГР_{14}$), A^3_{15} – гидрозамки ($ГЗ_{15}$), A^3_{16} – гидродвигатели ($ГД_{16}$);

– ГПОСП включают в себя: A^3_{17} – гидравлические коммуникации ($ГК_{17}$), A^3_{18} – распределители ($ГР_{18}$), A^3_{19} – гидрозамки ($ГЗ_{19}$), A^3_{20} – гидроцилиндры ($ГЦ_{20}$);

– ГХП включают в себя: A^3_{21} – гидравлические коммуникации ($ГЦ_{21}$), A^3_{22} – распределители ($ГР_{22}$), A^3_{23} – гидрозамки ($ГЗ_{23}$), A^3_{24} – гидродвигатель ($ГД_{24}$);

– ГХЛ включают в себя: A^3_{25} – гидравлические коммуникации ($ГЦ_{25}$), A^3_{26} – распределители ($ГР_{26}$), A^3_{27} – гидрозамки ($ГЗ_{27}$), A^3_{28} – гидродвигатель ($ГД_{28}$);

– ГО включают в себя: A^3_{29} – гидравлические коммуникации ($ГК_{29}$), A^3_{30} – распределители ($ГР_{30}$), A^3_{31} – гидрозамки ($ГЗ_{31}$), A^3_{32} – гидроцилиндры ($ГЦ_{32}$);

– НС включают в себя: A^3_{33} – электропривод ($ЭП_{33}$), A^3_{34} – насосную группу ($НГ_{34}$), A^3_{35} – клапаны ($К_{35}$), A^3_{36} – фильтры ($Ф_{36}$).

Также к третьему уровню относятся составляющие элементы подсистемы механической системы:

– ПИО включают в себя: B^3_1 – электродвигатель ($Э_{м1}$), B^3_2 – корпус редуктора ($КР_{м2}$), B^3_3 – валы в сборе с подшипниками зубчатыми колесами ($ВС_{м3}$);

– ИО включают в себя: B^3_4 – корпус исполнительного органа ($КИО_{м4}$), B^3_5 – забурник ($З_{м5}$), B^3_6 – резцедержатели ($РД_{м6}$), B^3_7 – резцы ($Р_{м7}$);

– К включают в себя: B^3_8 – электроприводы ($Э_{м8}$), B^3_9 – раму конвейера ($РК_{м9}$), B^3_{10} – цепь скребковую ($ЦС_{м10}$);

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

Рис. 2. Структура системы проходческого комбайна типа КСП-32

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

К четвертому уровню относятся: узлы, детали, уплотнения, приборы, различные клапаны, манометры и другие устройства, входящие в элементы подсистемы гидравлической системы третьего уровня, а также валы, зубчатые колеса, муфты, подшипники, приводные и натяжные звезды, катки, траки гусениц механизмов перемещения, механические узлы манипулятора исполнительного органа (турель) и другие узлы и детали, формирующие подсистемы механической системы.

Предварительный анализ данных о надежности проходческих комбайнов типа КСП-32, полученных при пассивных экспериментальных исследованиях в проходческих забоях на трех шахтах показал, что основные значения показателей надежности – вероятность безотказной работы, интенсивность отказов и коэффициент готовности свидетельствуют, что ГСК менее надежная, чем МСК. Кроме этого, результат анализа заключений семи экспертов, полученных методом «Делфи» [14], также подтвердил, что надежность ГСК значительно ниже, чем надежность МСК, что обусловливает необходимость в первую очередь проведения работ по повышению надежности ГСК для достижения общей цели повышения надежности проходческого комбайна.

Структурный анализ подсистем гидравлической системы комбайна КСП-32 показывает, что все подсистемы состоят из элементов с последовательным соединением и представляют собой структуру без резервирования. При таком соединении элементов выход из строя любого элемента приводит к отказу подсистемы в целом. Блок-схема надежности последовательного соединения i-го числа элементов k-й подсистемы гидравлической системы проходческого комбайна приведена на рис. 3.

Вероятность безотказной работы k-й подсистемы $P_{n,k}(t)$ при последовательном соединении ее элементов определяется как произведение вероятностей безотказной работы ее i элементов p_{i0}:

$$P_{n,k}(t) = p_1(t)p_1(t)...p_i(t) = \prod_1^i p_i \,. \qquad (1)$$

Следует отметить, что и вся гидравлическая система комбайна также является системой с последовательным соединением подсистем, поскольку выход из строя одной из десяти подсистем приводит к неработоспособному состоянию всей гидравлической системы комбайна. Вероятность безотказной работы системы определяется аналогично зависимости (1):

$$P(t) = P_{n,1}(t)P_{n,2}(t)...P_{n,10}(t) = \prod_1^{10} P_{n,k}(t) \,. \quad (2)$$

Вероятность безотказной работы гидравлической системы не может быть выше вероятности безотказной работы самой ненадежной из ее подсистем. Следовательно, из ненадежных подсистем и составляющих подсистемы элементов нельзя создать высоконадежную систему.

Для обеспечения надежности вновь проектируемых гидравлических систем используются два подхода, дополняющих друг друга.

Первый подход предполагает использование высоконадежной элементной базы, спроектированной и изготовленной по современным технологиям и проверенной на испытательных стендах в условиях завода-изготовителя и в шахтных условиях при интенсивных режимах эксплуатации. При этом целесообразно использовать качественные материалы со стабильными характеристиками, имеющие малый разброс параметров, а также использовать детали с повышенной прочностью, имеющие повышенные износостойкость, коррозионную устойчивость и защиту элементов от внешних вредных воздействий.

Второй подход заключается в применении в резервировании**.** На способ и схему резервирования элементов оказывают влияние причины возникновения отказов. Так, например, в гидравлической насосной станции проходческого комбайна КСП-32 подача рабочей жидкости от насосной группы в напорную магистраль

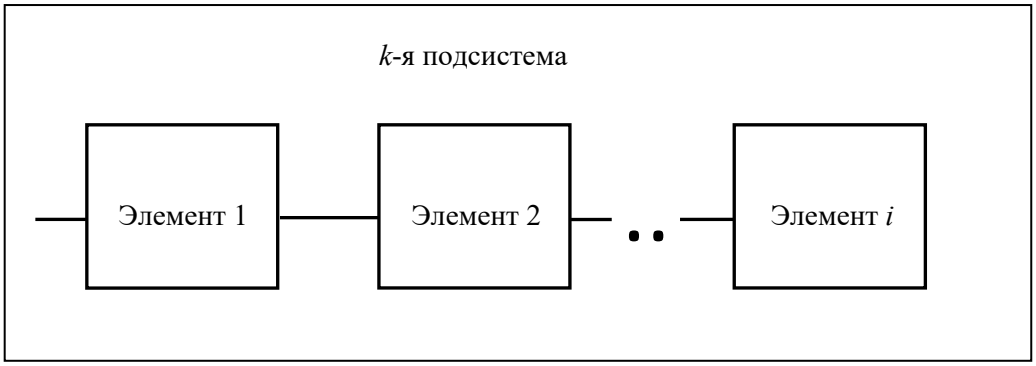


Рис. 3. Блок-схема k-й подсистемы гидравлической системы проходческого комбайна

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

используется последовательное соединение фильтрующих элементов. При этом, в случае засорения любого из фильтров происходит отказ системы. При параллельном соединении в случае засорения одного из фильтров весь поток жидкости пойдет через второй фильтр и отказа системы не произойдет, хотя ее характеристики изменятся. Соответственно, в зависимости от схемы соединения фильтрующих элементов и рассматриваемого вида отказа параметры надежности насосной группы рассчитываются по разным моделям.

Между приведенными на рис. 2 структурами систем и подсистем проходческого комбайна и выполняемых ими функций существует связь. Как известно, в системном анализе широко используется функционально-структурный подход [10,11], который применен и в настоящем исследовании для анализа качества функционирования гидравлической системы и приведенных выше подсистем гидравлической системы проходческого комбайна.

Различные подсистемы выполняют разные функции, и анализ их взаимодействия с надсистемой показывает, что на высоко нагруженные подсистемы ГПрИО и ГПдИО, обеспечивающие перемещения исполнительного органа в горизонтальной и вертикальной плоскости пласта, действуют высокие суммарные нагрузки от сил резания и подачи на резцах исполнительного органа. Подсистемы ГПрИО и ГПдИО, а также подсистема ГНЛ находятся в эксплуатации длительное время, что также отрицательно влияет на надежность работы этих подсистем. Указанные подсистемы не используются только во время перегона комбайна в новое положение для выполнения следующей заходки проходческого цикла и во время распора корпуса комбайна в почву выработки при помощи опорных гидроцилиндров и стола питателя, что в сумме составляет всего примерно пять процентов общего времени работы машины.

Качество функционирования и надежности гидравлической системы, ее подсистем и узлов следует оценивать применительно к качеству функционирования и надежности системы более высокого порядка. Т.е. функционирование и надежность улов необходимо оценивать применительно к подсистемам, а функционирование подсистем гидравлической системы – применительно к гидравлической системе, функционирование же гидравлической системы (или механической системы) следует оценивать применительно к качеству функционирования и надежности проходческого комбайна (надсистемы). Это совместное рассмотрение надсистемы, систем, подсистем и составляющих их узлов как целого и как совокупности отдельных частей (элементов) и применено в настоящей работе.

Гидравлическое оборудование комбайнов, как и любое другое оборудование, в процессе работы изнашивается и нуждается в контроле его состояния, обеспечивающем надежное выполнение предписанных им функций, а также в проведении технического обслуживания. Под техническим обслуживанием систем понимается совокупность мероприятий, которые служат поддержанию и восстановлению рабочих свойств систем. Данные мероприятия включают следующие работы:

– периодическое техническое обслуживание;

– контроль работоспособности и диагностика отказов;

– ремонтные (восстановительные) работы.

К задачам организации технического обслуживания относятся: установление графиков проведения проверок исправности гидравлической системы комбайна; установление графиков проведения профилактического обслуживания. Профилактические (регламентные) работы проводятся в системах проходческих комбайнов, которые еще не утратили работоспособность. Действия, необходимые для восстановления работоспособности после отказов, относятся к ремонтным (восстановительным) работам. Обычно профилактическими работами называют предупредительные, а ремонтные работы называются аварийным восстановлением.

Эффективность функционирования проходческих комбайнов, их систем, подсистем и узлов, входящих в подсистемы, а также техническое обслуживание систем, подсистем и узлов существенно зависит от процессов, происходящих внутри элементов систем и определяющих вид отказов.

В теории надежности различают внезапные и постепенные отказы. Внезапные отказы в гидравлических системах проходческих комбайнов могут произойти из-за мгновенного выхода из строя элементов, например, разрыва манжет и уплотнений, поломки гидравлических замков, обратных клапанов и распределителей, что переведет систему из работоспособного состояния в состояние отказа. Постепенные отказы происходят, когда нормальное функционирование элементов систем проходческого комбайна сохраняется в определенном интервале их параметров, которые при эксплуатации, как известно, изменяются с течением времени. Эти отказы происходят, например, при износе выше допустимых значений внутренних поверхностей гидроцилиндров, поверхностей поршней и направляющих

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

втулок цилиндров, а также износе рабочих поверхностей гидравлических распределителей подсистем ГПрИО, ГПдИО, ГТИО, ГПОСП, ГО. Контроль изменения значений параметров позволяет наблюдать за состоянием работоспособности или неработоспособности систем и их составляющих элементов. Контрольные проверки и диагностика являются обязательной частью стратегии по восстановлению работоспособности систем комбайнов.

Т.к. отказы систем проходческих комбайнов, их подсистем или узлов подсистем приводят к значительным экономическим потерям, но, с другой стороны, диагностика и контроль также требуют экономических затрат, возникает задача минимизации общих затрат при разработке методики обслуживания, включающей частоту проверок и сроков проведения технического обслуживания проходческих комбайнов. В этом случае необходимо определить сроки проведения диагностики и контрольных проверок по обнаружению неисправностей, при которых суммарные затраты на проведение контроля и потери от простоя проходческих комбайнов из-за несвоевременного обнаружения и замены вышедших из строя элементов минимизируются.

Ремонтные (восстановительные) [15] мероприятия проходческих комбайнов являются более трудоемкими по содержанию работы. Они связаны с проведением комплексной проверки работоспособности систем, заменой отказавших или выработавших установленный ресурс элементов, регулировкой отдельных параметров и прочими работами.

Еще одна задача, относящаяся к задачам организации обслуживания систем, заключается в том, какое количество запасных элементов необходимо иметь для того, чтобы быть уверенным в том, что система с достаточной вероятностью будет бесперебойно функционировать в течение заданного времени.

Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что для повышения надежности гидравлических систем проходческих комбайнов избирательного действия со стреловидными исполнительными органами целесообразно применять системный подход и системный анализ.

Структурная схема проходческого комбайна КСП-32 имеет вид дерева целей и представляет собой иерархическую структуру системы из пяти уровней:

– на нулевом уровне (уровне общей цели) представлена сама надсистема – проходческий комбайн;

– на первом уровне представлены гидравлическая и механическая системы комбайна;

– на втором уровне приведено 15 подсистем, из которых 9 подсистем входят в гидравлическую систему, а 6 подсистем входят в механическую систему комбайна;

– на третьем уровне представлены узлы, входящие в подсистемы гидравлической и механической системы;

– к четвертому уровню отнесены узлы, детали, уплотнения, приборы, различные клапаны, манометры и другие устройства, входящие в элементы подсистемы гидравлической системы и механической системы третьего уровня.

Для обеспечения надежности вновь проектируемых гидравлических систем целесообразно использование высоконадежной элементной базы, спроектированной и изготовленной по современным технологиям, а также целесообразно резервирование.

Структурно-функциональный анализ позволил поставить задачи установления целесообразности обеспечения запасными частями для технического обслуживания проходческих комбайнов.

Список литературы

1. Горбатов, П.А. Горные машины для подземной добычи угля: Учебн. пособ. для вузов / П.А. Горбатов, Г.В. Петрушкин, Н.М. Лысенко и др. – 2-е изд. перераб. и доп. – Донецк: Норд Компьютер, 2006. – 669 с.
2. Воскобойников, А.Э. Системные исследования: базовые понятия, принципы и методология / Знание. Понимание. Умение. – 2013 – №6: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.zpu-journal.ru/e-zpu/2013/6/Voskoboinikov_Systems-Research/
3. Аполов, О.Г. Теория систем и системный анализ. Курс лекций. – Уфа, 2012. – 274 с.
4. Блауберг, И.В. Системный подход в современной науке / И.В. Блауберг, В.Н. Садовский, Э.Г. Юдин // В кн. Проблемы методологии системных исследований. – М.: Мысль, 1970. – С. 7-48.
5. Виноградов, В.А. Система, ее актуализация и описание / В.А. Виноградов, Е.Л. Гидсбург // Системные исследования. Ежегодник. – М.: «Мысль», 1972. – 432 с.
6. Эмби, Р.У. Введение в кибернетику. – Изд. 2-е стереотипное. – М.: Иностранная литература, 2005. – С. 125-142.
7. Pan, J. Software Reliability / Dependable Embedded Systems. – Carnegie Mellon University, 1999. – 311 p.
8. Trachtenberg, M. Discovering How to Ensure

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

Software Reliability / RCA Engineer. – 1982. – No.1-2. – P. 53-57.
9. Антонов, А.В. Системный анализ. Учеб. для вузов. – М.: Высш. школа, 2004. – 454 с.
10. Горбатов, С.В. Системный подход в современной науке / С.В. Горбатов, В.Н. Юдин // Проблемы методологии системных исследований / Информатика и Образование. – 2008. – №5. – 312 с.
11. Качала, В.В. Основы системного анализа. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2004. – 104 с.
12. Шабаев, О.Е. Научные основы анализа и синтеза горных машин как мехатронных систем: дисс. … на соискание науч. степени докт. техн. наук: 05.05.06 – Горные машины / Шабаев Олег Евгеньевич. – Донецк, 2011. – 371 с.
13. Шабаев, О.Е. Техническая диагностика резцового исполнительного органа проходческого комбайна / О.Е. Шабаев, И.И. Бридун, Н.В. Хиценко. – Донецк, 2015. – 199 с.
14. Веденеева, Е.А. Функции и формулы Excel 2007. – СПб.: Питер, 2008. – 384 с.
15. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта. Термины и определения. Межгосударственный стандарт // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mega-norm.ru

N.G. Afendikov /Cand. Sci. (Eng.)/, A.V. Shendrik, K.B. Lomakovskij
Donetsk National Technical University (Donetsk)

IMPROVING THE RELIABILITY OF SELECTIVE ACTION ROADHEADERS WITH SAGGITAL WORKING BODIES

Background. *Modern roadheaders are complex machines consisting of a large number of mechanisms: working bodies, hydraulic drives, movement mechanisms of working bodies, movement mechanisms of roadheaders, parts, units, therefore, the roadheader considered as the technical system intended for performance of certain functions.*
Materials and /or methods*. The developed structural model of a selective action roadheader type KSP-32 has the form of a hierarchy of goals and represents a hierarchical structure. The level of the overall objective is to ensure the reliability of the roadheader as a whole (the supersystem). At the first level, the reliability of hydraulic and mechanical systems evaluated. The hydraulic system on the second level includes nine subsystems; the mechanical system includes six subsystems.*
Results. *To ensure the reliability of the newly designed hydraulic systems, proposed two approaches: the first approach is to use a highly reliable element base, designed and manufactured using modern technologies and tested on test benches in the conditions of the manufacturer's plant, and in mines under intensive operating conditions; the second approach is to use in redundancy.*
Conclusion. *When ensuring reliability at the stage of operation, the task of minimizing the total cost of inspections and maintenance of roadheaders arises. For this purpose rational terms of diagnosis for fault detection established, in which the costs of control and costs of failure and downtime as well as recovery of systems, subsystems and replacement of the failed elements reduced.*

Keywords*: system approach, roadheader, decomposition, systems, subsystems, components, maintenance, repairs.*

Сведения об авторах
Н.Г. Афендиков
ORCID ID: 0000-0001-8876-7254
Телефон: +380 (71) 376-13-46
Эл. почта: an77tn@gmail.com
К.Б. Ломаковский
Телефон: +380 (71) 309-17-06
Эл. почта: battleship-1914@mail.ru
А.В. Шендрик
Телефон: +380 (71) 311-09-88
Эл. почта: gormash@i.ua

Статья поступила 29.11.2018 г.
© Н.Г. Афендиков, А.В. Шендрик, К.Б. Ломаковский, 2018
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко

УДК 621.695

А.П. Кононенко /д.т.н./, Р.И. Божко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ НАГНЕТАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК

Уточнены особенности рабочего процесса и энергоэффективность работы нагнетательных эрлифтных установок при использовании в качестве источников пневмоэнергии ряда серийно производимых радиальных нагнетателей. Приведено аналитическое обоснование возможного увеличения рабочих параметров (геометрических погружений смесителей, высот подъема и подач) нагнетательных эрлифтных установок в сравнении с эрлифтными установками традиционной конструкции.

Ключевые слова: *радиальный нагнетатель, эрлифт, высота подъема, подача, энергоэффективность.*

Постановка проблемы

В эрлифтах традиционной технологической схемы предусматривается безнапорное (самотечное) транспортирование жидкости (гидросмеси) от данного средства подъема к потребителю. В случае если геодезическая отметка потребителя перекачиваемой жидкости (гидросмеси) превышает максимально возможную отметку центра тяжести сечения выходного отверстия воздухоотделителя традиционного эрлифта, применение последнего становится невозможным.

Нагнетательные эрлифтные установки, обеспечивающие напорное транспортирование жидкостей (гидросмесей) от воздухоотделителя по назначению, расширяют рациональную область применения газожидкостных подъемников.

Для реализации такого способа работы эрлифта необходимо обеспечивать требуемое избыточное давление в воздухоотделителе, что, однако, при традиционной схеме установки приводит к ощутимому снижению энергоэффективности его рабочего процесса. Сохранить (а зачастую и повысить) энергетическую эффективность работы нагнетательной эрлифтной установки в сравнении с традиционной возможно утилизацией энергии частично сжатого воздуха, подавая его из воздухоотделителя во всасывающий патрубок радиального нагнетателя (именно такой тип нагнетателей наиболее часто используется в качестве источников пневмоэнергии для эрлифтов).

Однако, в зависимости от индивидуальных газодинамических (расходных, энергетических) характеристик радиальных нагнетателей, утилизация энергии частично сжатого воздуха, подаваемого во всасывающий патрубок нагнетателя, для радиальных машин различного типоразмера в итоге приводит к различной степени увеличения энергоэффективности работы всей нагнетательной эрлифтной установки в сравнении с эквивалентной установкой традиционной схемы.

Поэтому установление технико-экономической целесообразности применения серийно производимых радиальных нагнетателей в качестве источников пневмоэнергии для нагнетательных эрлифтов является актуальной научной задачей, имеющей существенное практическое приложение.

Анализ последних исследований и публикаций

Обоснование энергетической целесообразности и областей применения нагнетательных эрлифтных установок выполнено в [1,2]. Однако в указанных работах анализ эффективности работы нагнетательной эрлифтной установки выполнен, как пример, только при использовании в качестве источника пневмоэнергии нагнетателя ЦНВ 200/3,0 (серийное производство ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования», г. Хабаровск, РФ). В то же время для пневмоснабжения общепромышленных эрлифтов приемлемо использование достаточно широкого ряда радиальных нагнетателей [3], целесообразность применения которых в составе нагнетательных установок требует доказательства.

В [1] анализ энергоэффективности рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки выполнен с рядом допущений (например, о плотности аэрогидросмеси в подъемной трубе эрлифта, методике построения семейства газодинамических характеристик радиального нагнетателя при различных давлениях всасываемого воздуха и др.), что также требует уточнения.

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

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является уточнение особенностей рабочего процесса и энергоэффективности работы нагнетательных эрлифтных установок при использовании в качестве источников пневмоэнергии ряда серийно производимых радиальных нагнетателей.

Основной материал исследования

В составе общепромышленных нагнетательных эрлифтных установок, исходя из технических параметров и газодинамических характеристик, возможно использование следующих серийно производимых воздушных нагнетателей, которые условно могут быть разделены на три классификационные группы – с абсолютным давлением сжатого воздуха $p_н$=(1,29…1,62)·10^5 Па (1,32…1,65 кгс/см^2) и производительностью $Q_н$=0,667…4,33 м^3/с (40…260 м^3/мин) (ЦНВ 60/1,4; ЦНВ 60/1,6; ЦНВ 100/1,4; ЦНВ 100/1,6; ЦНВ 160/1,4; ЦНВ 160/1,6; ЦНВ 200/1,4; ЦНВ 200/1,6), с абсолютным давлением сжатого воздуха $p_н$=(1,54…2,43)·10^5 Па (1,57…2,48 кгс/см^2) и производительностью $Q_н$=1,92…14,8 м^3/с (115…890 м^3/мин) (ЦНВ 280/2,1; 360-21-1; 360-22-1; ЦНВ 750/2) и с абсолютным давлением сжатого воздуха $p_н$=(2,68…3,43)·10^5 Па (2,73…3,50 кгс/см^2) и производительностью $Q_н$=1,25…3,77 м^3/с (75…226 м^3/мин) (ЦНВ 80/3,2; ЦНВ 100/3,2; ЦНВ 130/3,2; ЦНВ 160/3,2; ЦНВ 200/3,0) [3]. Все перечисленные нагнетатели производятся ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования».

Принципиальная схема нагнетательной эрлифтной установки предполагает подвод частично сжатого воздуха от воздухоотделителя эрлифта во всасывающий патрубок нагнетателя (рис. 1).

Эпюры давлений в подъемных трубах эрлифтов традиционной, нагнетательной и эквивалентных схем установок позволяют обосновать правомерность принятой методики сравнения энергетической эффективности работы рассматриваемых газожидкостных подъемников (рис. 2).

Изменение газодинамических характеристик радиального нагнетателя при изменении давления всасываемого воздуха приведено на примере нагнетателя ЦНВ 200/3,0 (рис. 3).

Подробные описания схемы и работы нагнетательной эрлифтной установки (рис. 1), особенностей эпюр давления в подъемных трубах эрлифтов (рис. 2) и построения газодинамических характеристик радиальных нагнетателей при изменении давления всасываемого воздуха (на примере нагнетателя ЦНВ 200/3,0) приведены в [1,2].

В названии рис. 2 α_0, $\alpha_{эн}$ и $\alpha_{эт}$ – относительные погружения смесителя эрлифта соответствующей технологической схемы.

Используя методику аналитического анализа параметров рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки, изложенную в [2] на примере применения в качестве источника пневмоэнергии радиального нагнетателя ЦНВ 200/3,0, выполнены аналогичные расчеты для негнетательных установок с нагнетателями ЦНВ 60/1,6; ЦНВ 100/1,6; 360-22-1; ЦНВ 80/3,2, представляющими все три выше приведенные классификационные группы нагнетательных машин.

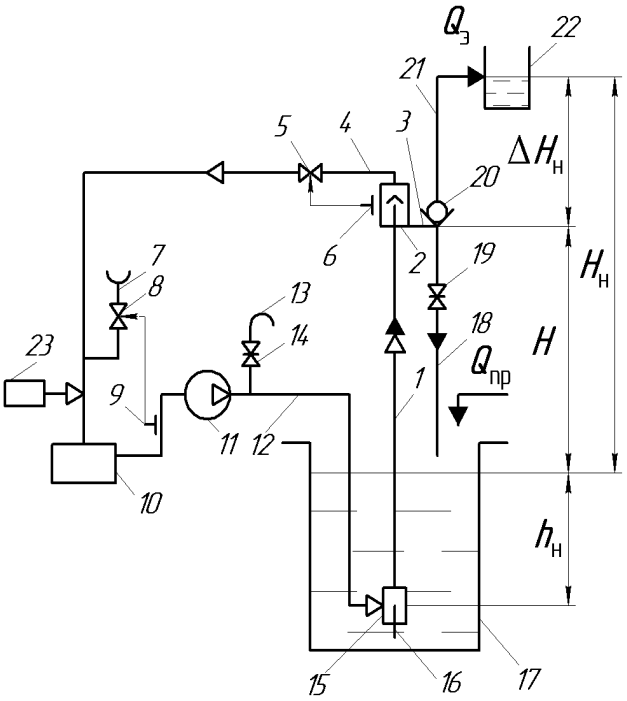


Рис. 1. Принципиальная схема нагнетательной эрлифтной установки:
1 − подъемная труба; *2* − воздухоотделитель;
3 − сливная труба; *4* − воздухоотводящая труба;
5, 8 − регулирующие клапаны;
6 − датчик уровня; *7* − патрубок;
9 − датчик давления; *10* − влагоотделитель;
11 − радиальный нагнетатель;
12 − напорный воздухопровод;
13 − пусковой патрубок; *14, 19* − задвижка;
15 − смеситель; *16* − подающая труба;
17 − зумпф; *18* − сбросной трубопровод;
20 − обратный клапан;
21 – отводящий трубопровод;
22 − потребитель перекачиваемой жидкости;
23 – дополнительный источник сжатого воздуха,
$h_н$ – глубина погружения смесителя;
H – высота подъема; $\Delta H_н$ – высота переподъема;
$H_н$ – высота подъема
нагнетательного эрлифта

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

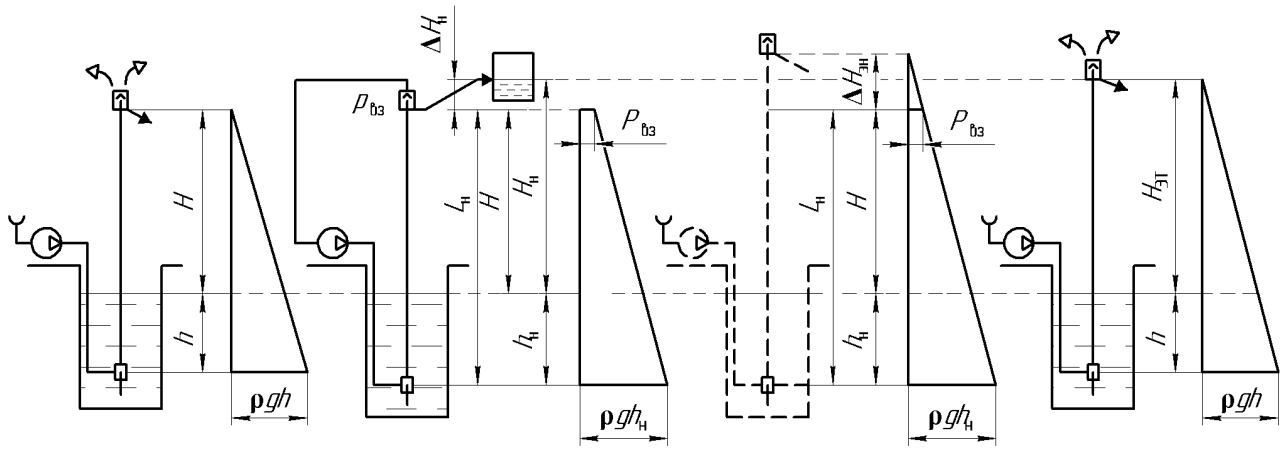


Рис. 2. Эпюры давлений в подъемных трубах эрлифта:
а – традиционной технологической схемы, α_0; *б* – нагнетательного эрлифта;
в – эквивалентного нагнетательного эрлифта,$\alpha_{эн}$; *г* – эквивалентного традиционного эрлифта, $\alpha_{эт}$

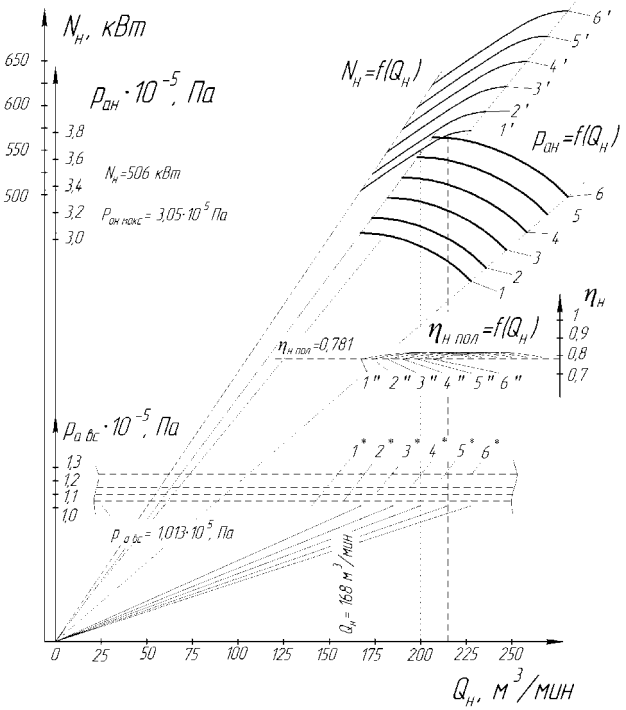


Рис. 3. Газодинамические характеристики нагнетателя ЦНВ 200/3,0 при абсолютных давлениях во всасывающем патрубке $p_{а\,вс}$=(1,013…1,250)·10^5 Па:
1 − 1,013·10^5 Па; *2* − 1,05·10^5 Па; *3* − 1,1·10^5 Па;
4 − 1,15·10^5 Па; *5* − 1,2·10^5 Па;
6 − 1,25·10^5 Па; *1*…*6* − $p_{а\,н}=f(Q_н)$;
1′…*6′* − $N_н=f(Q_н)$, *1″*…*6″* − $\eta_н=f(Q_н)$;
*1**…*6** − линии постоянного абсолютного давления $p_{а\,вс}$

В данной работе алгоритм определения значимых параметров рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки также приведен на примере использования в качестве источника пневмоэнергии нагнетателя ЦНВ 200/3,0.

Значения параметров нагнетателя ЦНВ 200/3,0 в диапазоне давлений во всасывающем патрубке $p_{а\ вс}$=(1,013…1,250) 10^5 Па (табл. 1) определены по газодинамическим характеристикам (рис. 3), а именно: $p_{а\,н\,макс}$ – максимально возможное абсолютное давление сжатого воздуха; $\varepsilon_{макс}=p_{а\,н\,макс}/p_0$ – максимально возможная степень сжатия нагнетателя (p_0=1,013·10^5 Па – атмосферное давление); $Q_н$, $\eta_н$ – соответственно производительность и КПД нагнетателя.

Значения параметров эрлифтной установки (традиционной конструкции и нагнетательной) определены с использованием ниже приведенных зависимостей [4…9], обоснование правомерности применения которых приведены в [2].

Возможное геометрическое погружение нагнетательного эрлифта:

$$h_н = \frac{p_{а\,н\,макс} - p_0}{\rho \cdot g}, \qquad (1)$$

где ρ – плотность транспортируемой жидкости (гидросмеси) (как пример, расчеты выполнены для случая транспортирования воды, ρ=1000 кг/м^3); *g* – ускорение свободного падения.

При использовании в составе эрлифтной установки нагнетателя ЦНВ 200/3,0 и значений $p_{а\,н\,макс}$=3,050·10^5 Па ($p_{а\,вс}$=1,013·10^5 Па) геометрические погружения смесителей эрлифтов традиционной технологической схемы и нагнетательного равны между собой $h=h_н$=20,8 м (рис. 2, табл. 1).

Высота подъема эрлифта (рис. 2а):

$$H = \frac{h(1-\alpha_0)}{\alpha_0}. \qquad (2)$$

Высота переподъема эрлифта:

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

– нагнетательного (рис. 2б):

$$\Delta H_{н} = \frac{p_{а\ вз} - p_0}{\rho \cdot g}, \qquad (3)$$

где $p_{а\ вз}$ – абсолютное давление в воздухоотделителе;

– эквивалентного нагнетательного (рис. 2в) [2]:

$$\Delta H_{эн} = \frac{L_{н} \cdot p_{вз}}{\rho \cdot g \cdot h_{н} - p_{вз}}, \qquad (4)$$

где $L_{н}=h_{н}+H$ – длина подъемной трубы нагнетательного эрлифта (рис. 2); $p_{вз}$ – избыточное давление в воздухоотделителе, $p_{вз}=p_{а\ вз}-p_0$.

Высота подъема нагнетательного эрлифта (рис. 2б):

$$H_{н} = H + \Delta H_{н}. \qquad (5)$$

Относительное погружение смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта (рис. 2в):

$$\alpha_{эн} = \frac{h_{н}}{L_{н} + \Delta H_{т}}, \qquad (6)$$

где $h_{н}$ – геометрическое погружение смесителя нагнетательного эрлифта ($h_{н}>h$).

КПД нагнетательного эрлифта (рис. 2б):

$$\eta_{эн} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{н}}{q_{н} \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{а\ н\ макс}}{p_{а\ вз}}}. \qquad (7)$$

Высота подъема эквивалентного традиционного эрлифта (рис. 2г):

$$H_{эт} = H_{н} = H + \Delta H_{н}. \qquad (8)$$

Относительное погружение эквивалентного традиционного эрлифта (рис. 2г):

$$\alpha_{эт} = \frac{h}{H_{эт} + h}, \qquad (9)$$

где h=20,8 м для всех значений $H_{эт}$.

КПД эквивалентного традиционного эрлифта (рис. 2г):

$$\eta_{эт} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{эт}}{q_{эт} \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{а\ н\ макс}}{p_0}}. \qquad (10)$$

В (10) значение давления $p_{ан\ макс}$ неизменно и равно $3{,}05 \cdot 10^5$ Па.

Удельный расход воздуха:

$$q = 0{,}767 \cdot \alpha^{-2{,}2}, \qquad (11)$$

подача эрлифта:

$$Q_{э} = \frac{Q_{в}}{q} \qquad (12)$$

и КПД эрлифтной установки:

$$\eta_{эу} = \eta_{э} \cdot \eta_{н} \qquad (13)$$

определяются по приведенным зависимостям [4,9] как для нагнетательного эрлифта, так и для эрлифта традиционной конструкции при соответствующих значениях α, q, $Q_{н}$, $\eta_{э}$.

Вычисления были проведены по зависимостям (1)…(13) в диапазоне значений относительных погружений смесителя α_0=0,15…0,90 ($\Delta\alpha_0$=0,05). Как пример – результаты вычислений при начальном относительном погружении α_0=0,3 приведены в табл. 1.

Рекомендуемое относительное погружение эрлифтов традиционной конструкции составляет $0{,}15 \le \alpha < 1$ [4…6].

Повышение давления в воздухоотделителе (во всасывающем патрубке нагнетателя ЦНВ 200/3,0) от атмосферного ($p_{а\ вз}=p_{а\ вс}=1{,}013 \cdot 10^5$ Па) до избыточного ($p_{а\ вз}=p_{а\ вс}=1{,}250 \cdot 10^5$ Па) обеспечивает увеличение относительного погружения смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{эн}$=0,300 до $\alpha_{эн}$=0,335 при уменьшении относительного погружения смесителя эквивалентного традиционного эрлифта от $\alpha_{эт}$=0,300 до $\alpha_{эт}$=0,290 при относительном погружении смесителя эрлифта традиционной технологической схемы α_0=0,3 табл. 1, рис. 4, 5).

Объясняется это преимущественным влиянием на величину $\alpha_{эн}$ (6) интенсивности увеличения возможного геометрического погружения $h_{н}$ (1), (табл. 1) нагнетательного эрлифта и интенсивности влияния на величину $\alpha_{эт}$ (9) увеличения высоты подъема $H_{эт}$ при постоянном значении h эквивалентного традиционного эрлифта в условиях роста давления в воздухоотделителе в диапазоне $p_{а\ вз}=(1{,}013…1{,}250) \cdot 10^5$ Па.

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

Табл. 1. Результаты расчета параметров работы нагнетательного и традиционного эрлифтов с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в диапазоне абсолютных давлений во всасывающем патрубке нагнетателя $p_{а\,вс}$=(1,013…1,250)·10^5 Па при α_0=0,3

$p_{а\,вс}\cdot10^{-5}$, Па	1,013	1,050	1,100	1,150	1,200	1,250
$p_{а\,н\,макс}\cdot10^{-5}$, Па	3,050	3,163	3,313	3,464	3,614	3,765
ε	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01
$Q_н$, м^3/мин (м^3/с)	168 (2,80)	174 (2,90)	183 (3,05)	191 (3,18)	199 (3,32)	208 (3,47)
$\eta_н$	0,781	0,781	0,781	0,781	0,781	0,781
$h_н$, м	20,8	21,9	23,4	25,0	26,5	28,1
H, м	48,5	48,5	48,5	48,5	48,5	48,5
$\Delta H_н$, м	0,00	0,38	0,89	1,40	1,91	2,42
$\Delta H_{эн}$, м	0,00	1,23	2,83	4,35	5,81	7,21
$H_н$=$H_{эт}$, м	48,5	48,8	49,3	49,8	50,4	50,9
$\alpha_{эн}$	0,300	0,306	0,314	0,321	0,328	0,335
$q_{эн}$	10,8	10,4	9,82	9,33	8,89	8,50
$\eta_{эн}$	0,393	0,413	0,441	0,469	0,497	0,526
$\eta_{эун}$	0,307	0,323	0,345	0,366	0,388	0,411
$Q_{эн}$, м^3/ч (м^3/с)	930 (0,258)	1008 (0,280)	1115 (0,310)	1228 (0,341)	1314 (0,373)	1465 (0,407)
$\alpha_{эт}$	0,300	0,299	0,297	0,294	0,292	0,290
$q_{эт}$	10,8	10,9	11,1	11,3	11,5	11,7
$\eta_{эт}$	0,394	0,392	0,390	0,388	0,385	0,383
$\eta_{эут}$	0,307	0,306	0,304	0,303	0,301	0,299
$Q_{эт}$, м^3/ч (м^3/с)	930 (0,258)	921 (0,256)	906 (0,252)	892 (0,248)	878 (0,244)	864 (0,240)

Изложенная аналитическая методика исследования параметров рабочего процесса эрлифтных установок позволила получить зависимости КПД нагнетательного (7) и эквивалентного традиционного (10) эрлифтов от начального относительного погружения смесителя α_0 (источник пневмоэнергии ЦНВ 200/3,0, давление во всасывающем патрубке $p_{а\,вс}$=1,25·10^5 Па) (рис. 6).

Уравнения регрессии также правомерны при использовании в составе эрлифтных установок нагнетателя ЦНВ 200/3,0 и давлении во всасывающем патрубке $p_{а\,вс}$=1,25·10^5 Па:

$$\eta_{эт} = -0{,}0447 + 1{,}86\alpha_0 - 1{,}13\alpha_0^2 - 0{,}701\alpha_0^3, \quad (14)$$

$$\eta_{эн} = -0{,}0649 + 2{,}37\alpha_0 - 1{,}53\alpha_0^2 - 0{,}782\alpha_0^3. \quad (15)$$

Адекватность уравнений (14), (15) подтверждена с использованием критерия Фишера [10]. Уравнения, аналогичные (14) и (15), позволили получить зависимости относительного КПД нагнетательного эрлифта от начального относительного погружения смесителя $\bar{\eta}_{эн} = f(\alpha_0)$ ($\bar{\eta}_{эн} = \eta_{эн}/\eta_{эт}$) для эрлифтных установок, в составе которых в качестве источников пневмо энергии используются нагнетатели ЦНВ 60/1,6, ЦНВ 100/1,6, 360-22-1 и ЦНВ 80/3,2 (рис. 7).

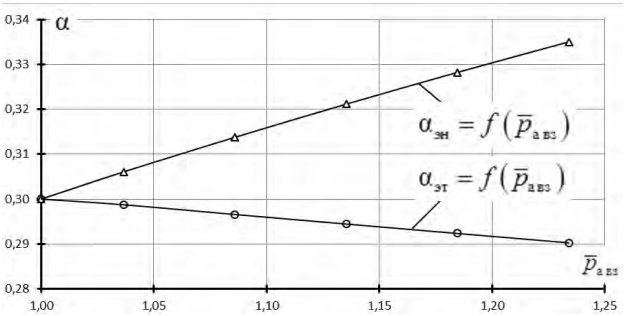


Рис. 4. Зависимости относительных погружений эквивалентных нагнетательного и традиционного эрлифтов от относительного давления в воздухоотделителе ($\bar{p}_{а\,вз} = p_{а\,вз} / p_0$) при использовании в составе установки нагнетателя ЦНВ 200/3 и α_0=0,3

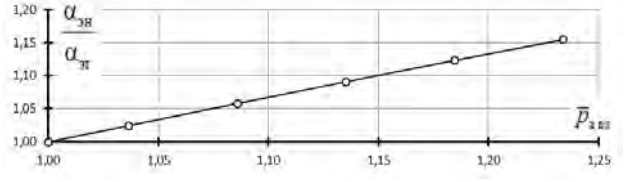


Рис. 5. Зависимость отношения относительных погружений эквивалентных нагнетательного и традиционного эрлифтов от относительного давления в воздухоотделителе $\alpha_{эн}/\alpha_{эт} = f(\bar{p}_{а\,вз})$ ($\bar{p}_{а\,вз} = p_{а\,вз} / p_0$) при использовании в составе установки нагнетателя ЦНВ 200/3 и α_0=0,3

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

Таким образом, энергоэффективность работы нагнетательного эрлифта в сравнении с традиционным увеличивается для всего ряда приведенных радиальных нагнетателей во всем исследуемом диапазоне начальных относительных погружений смесителя ($0{,}15 \le \alpha_0 \le 0{,}90$). Так, при $0{,}15 \le \alpha_0 \le 0{,}80$ наблюдается увеличение энергоэффективности применения нагнетательного эрлифта на 21,9…25,3 %, а при $\alpha_0 > 0{,}8$ имеет место более интенсивное возрастание энергоэффективности его работы: с нагнетателем ЦНВ 60/1,6 – 26,1 %; ЦНВ 100/1,6 – 29,9 %; 360-22-1 – 25,0 %; ЦНВ 80/3,2 – 25,4 % и ЦНВ 200/3,0 – 27,3 %.

Зависимости относительного КПД нагнетательного эрлифта от относительного давления в воздухоотделителе $\overline{\eta}_{эн} = f(\overline{p}_{а\,вз})$ ($\overline{p}_{а\,вз} = p_{а\,вз}/p_0$) позволили установить, что максимальные значения относительного КПД при граничном значении $\overline{p}_{а\,вз} = 1{,}234$ достигают: при использовании нагнетателя ЦНВ 60/1,6 – 1,27; ЦНВ 100/1,6 – 1,28; 360-22-1 – 1,33; ЦНВ 80/3,2 – 1,34 и ЦНВ 200/3,0 – 1,34 (рис. 8).

Получены также зависимости относительной высоты подъема $\overline{H}_{эн} = f(\overline{p}_{а\,вз})$ ($\overline{H}_{эн} = H_н / H$) (рис. 9) и относительной подачи $\overline{Q}_{эн} = f(\overline{p}_{а\,вз})$ ($\overline{Q}_{эн} = Q_{эн} / Q_{эт}$) (рис. 10) нагнетательного эрлифта от относительного давления в воздухоотделителе.

Из полученных результатов следует, что максимальные значения относительных высот подъема нагнетательных эрлифтов при граничном значении $\overline{p}_{а\,вз} = 1{,}234$ достигают: при использовании нагнетателя ЦНВ 60/1,6 – 1,17; ЦНВ 100/1,6 – 1,16; 360-22-1 – 1,07; ЦНВ 80/3,2 – 1,04 и ЦНВ 200/3,0 – 1,05.

Увеличение высоты подъема нагнетательного эрлифта $H_н = H + \Delta H_н$ (рис. 2б) при росте давления в воздухоотделителе $p_{а\,вз}$ обеспечивается увеличением высоты переподъема нагнетательного эрлифта $\Delta H_н$, которая соответствует значению гидростатического давления в воздухоотделителе.

Максимальные значения относительных подач нагнетательных эрлифтов составляют: при использовании нагнетателя ЦНВ 60/1,6 – 1,34; ЦНВ 100/1,6 – 1,37; 360-22-1 – 1,54; ЦНВ 80/3,2 – 1,59 и ЦНВ 200/3,0 – 1,58.

Увеличение энергоэффективности работы нагнетательного эрлифта в сравнении с эрлифтом традиционной конструкции (рис. 6…10) объясняется особенностью зависимостей $\alpha_{эн} = f(\overline{p}_{а\,вз})$, $\alpha_{эт} = f(\overline{p}_{а\,вз})$ (рис. 4…5). Вид данных зависимостей, указывающих на превышение относительного погружения эквивалентного нагнетательного

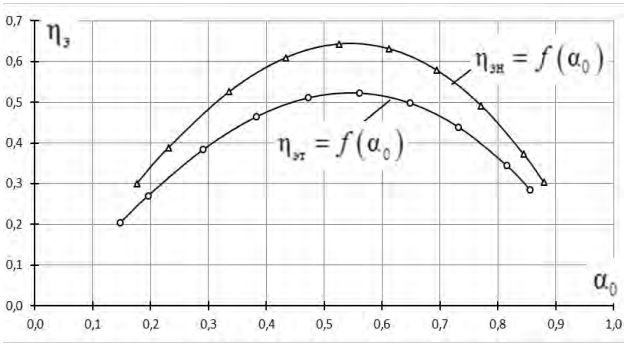


Рис. 6. Зависимости КПД нагнетательного $\eta_{эн}=f(\alpha_0)$, и эквивалентного традиционного $\eta_{эт}=f(\alpha_0)$, эрлифтов от начального относительного погружения смесителя, источник пневмоэнергии ЦНВ 200/3,0, давление во всасывающем патрубке $p_{а\,вс}=1{,}25\cdot10^5$ Па

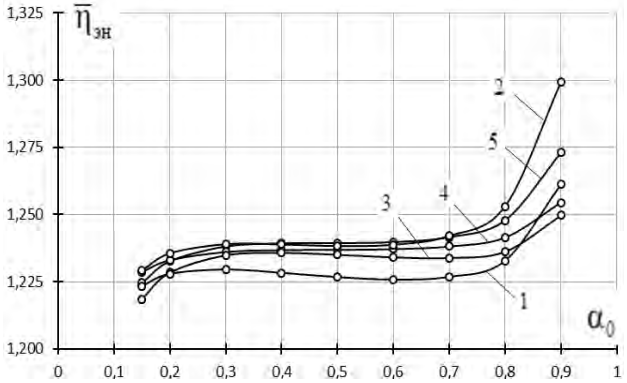


Рис. 7. Зависимости относительных КПД нагнетательных эрлифтов с радиальными нагнетателями: *1* – ЦНВ 60/1,6; *2* – ЦНВ 100/1,6; *3* – 360-22-1; *4* – ЦНВ 80/3,2; *5* – ЦНВ 200/3,0, от начального относительного погружения смесителя $\overline{\eta}_{эн} = f(\alpha_0)$. Для всех вариантов эрлифтных установок принято $p_{а\,вс}=1{,}25\cdot10^5$ Па

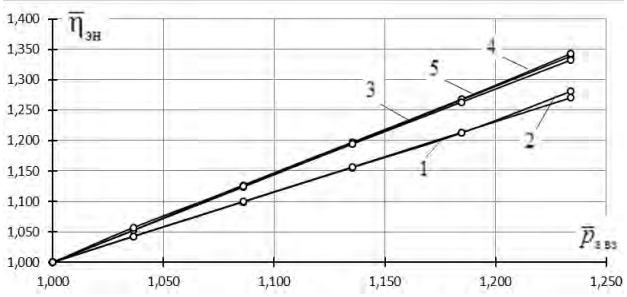


Рис. 8. Зависимости относительных КПД нагнетательных эрлифтов с радиальными нагнетателями: *1* – с ЦНВ 60/1,6; *2* – с ЦНВ 100/1,6; *3* – с 360-22-1; *4* – с ЦНВ 80/3,2; *5* – с ЦНВ 200/3,0, от относительного давления в воздухоотделителе $\overline{\eta}_{эн} = f(\overline{p}_{а\,вз})$ при $\alpha_0=0{,}3$

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

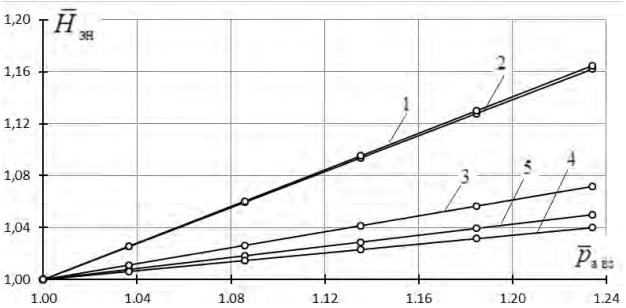


Рис. 9. Зависимости относительных высот подъема нагнетательных эрлифтов с радиальными нагнетателями: *1* – с ЦНВ 60/1,6; *2* – с ЦНВ 100/1,6; *3* – с 360-22-1; *4* – с ЦНВ 80/3,2; *5* – с ЦНВ 200/3,0, от относительного давления в воздухоотделителе $\overline{H}_{эн} = f(\overline{p}_{а\ вз})$ при α_0=0,3

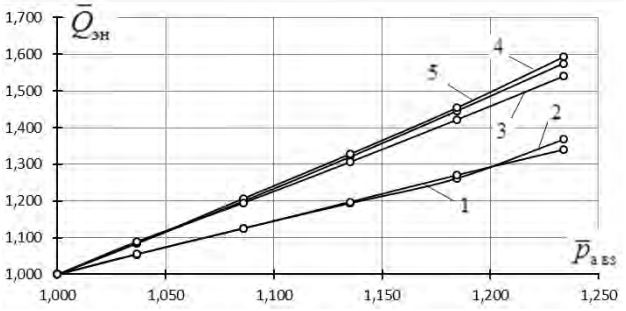


Рис. 10. Зависимости относительных подач нагнетательных эрлифтов с радиальными нагнетателями: *1* – с ЦНВ 60/1,6; *2* – с ЦНВ 100/1,6; *3* – с 360-22-1; *4* – с ЦНВ 80/3,2; *5* – с ЦНВ 200/3,0, от относительного давления в воздухоотделителе $\overline{Q}_{эн} = f(\overline{p}_{а\ вз})$ при α_0=0,3

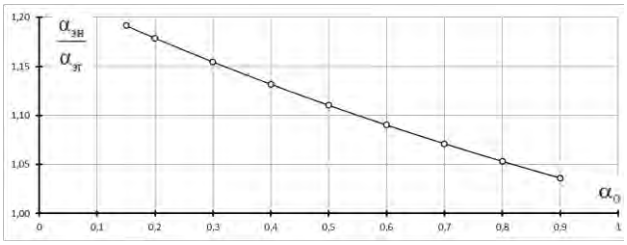


Рис. 11. Зависимость отношения относительных погружений эквивалентных нагнетательного и традиционного эрлифтов от начального относительного погружения смесителя при использовании в составе установки нагнетателя ЦНВ 200/3 с $\overline{p}_{а\ вз} = 1{,}234$

эрлифта $\alpha_{эн}$ над относительным погружением эквивалентного традиционного эрлифта $\alpha_{эт}$ в рассмотренном диапазоне значений $\overline{p}_{а\ вз}$, характерен для всех нагнетателей ЦНВ 60/1,6, ЦНВ 100/1,6, ЦНВ 200/3,0, 360-22-1, ЦНВ 80/3,2, принятых к анализу.

Однако кривая превышения относительного погружения эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{эн}$ над относительным погружением эквивалентного традиционного эрлифта $\alpha_{эт}$ монотонно убывает при увеличении начального относительного погружения эрлифтов α_0. ($\alpha_{эн}/\alpha_{эт}$=1,192 при α_0=0,15; $\alpha_{эн}/\alpha_{эт}$=1,036 при α_0=0,90) (рис. 11).

Превышение относительного погружения эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{эн}$ над относительным погружением эквивалентного традиционного эрлифта $\alpha_{эт}$ (увеличение энергоэффективности) объясняется значительным увеличением глубины погружения $h_н$ (на 35,1 %) и увеличением высоты подъема $H_т$ на величину $\Delta H_н$ (на 5 %) (рис. 2б) при увеличении относительного давления в воздухоотделителе до величины $\overline{p}_{а\ вз} = 1{,}234$ (при использовании в составе установки нагнетателя ЦНВ 200/3).

Используемая аналитическая методика анализа параметров позволила построить диаграмму максимальных значений: КПД эквивалентного традиционного эрлифта $\eta_{эт}$, КПД нагнетательного эрлифта $\eta_{эн}$, КПД эквивалентной традиционной эрлифтной установки $\eta_{эут}$ и КПД нагнетательной эрлифтной установки $\eta_{эун}$ для ряда радиальных нагнетателей (рис. 12). Построена также диаграмма относительных значений КПД $\overline{\eta}_{эн}$, относительных подач $\overline{Q}_{эн}$ и относительных высот подъема $\overline{H}_{эн}$ нагнетательного эрлифта (при α_0=0,3), максимальных относительных значений КПД нагнетательного эрлифта $\overline{\eta}_{эн\,макс}$ для данного ряда нагнетателей (рис. 13).

При вычислении безразмерных величин $\overline{\eta}_{эн}$ и $\overline{Q}_{эн}$ в качестве базовых принимались значения соответствующих параметров работы эквивалентной схемы традиционного эрлифта (рис. 2г).

Максимальное значение КПД эквивалентного традиционного эрлифта с рассматриваемым рядом нагнетателей находится в диапазоне $0{,}369 \le \eta_{эт} \le 0{,}571$, КПД нагнетательного эрлифта – в диапазоне $0{,}452 \le \eta_{эн} \le 0{,}706$, КПД эквивалентной эрлифтной установки традиционной конструкции – в диапазоне $0{,}295 \le \eta_{эут} \le 0{,}482$, КПД нагнетательной эрлифтной установки – в диапазоне $0{,}362 \le \eta_{эун} \le 0{,}596$ (рис. 12).

Из диаграммы (рис. 13) следует, что при использовании рассматриваемого ряда нагнетателей в составе нагнетательных эрлифтных установок значения относительного КПД находятся в диапазоне $1{,}23 \ge \overline{\eta}_{эн} \le 1{,}24$, максимального относительного КПД – в диапазоне $1{,}25 \ge \overline{\eta}_{эн\,макс} \le 1{,}30$, значения относительной подачи – в диапазоне $1{,}23 \le \overline{Q}_{эн} \le 1{,}24$, значения относительной высоты подъема – в диапазоне $1{,}04 \le \overline{H}_{эн} \le 1{,}17$.

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

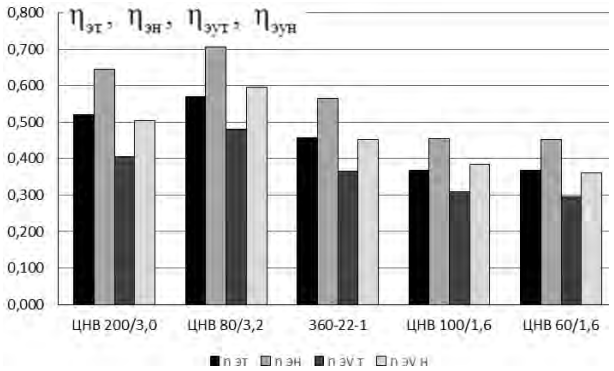


Рис. 12. Диаграмма максимальных значений КПД эквивалентного традиционного эрлифта $\eta_{эт}$, КПД нагнетательного эрлифта $\eta_{эн}$, КПД эквивалентной традиционной эрлифтной установки $\eta_{эут}$ и КПД нагнетательной эрлифтной установки $\eta_{эун}$ для ряда радиальных нагнетателей

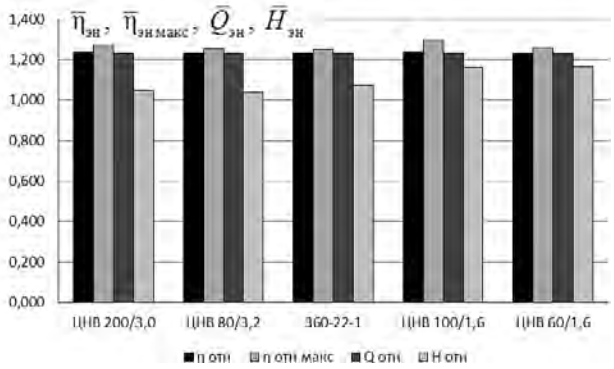


Рис. 13. Диаграмма относительных значений КПД, максимальных относительных значений КПД, относительных подач и относительных высот подъема нагнетательного эрлифта для ряда радиальных нагнетателей

Увеличение подачи нагнетательного эрлифта $Q_{эн}$ в сравнении с подачей эрлифта традиционной конструкции $Q_{эт}$ объясняется превышением относительного погружения эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{эн}$ над относительным погружением эквивалентного традиционного эрлифта $\alpha_{эт}$ при повышенном давлении в воздухоотделителе (рис. 5) при прочих равных условиях.

Результаты анализа работы эрлифтных установок [4,9,11…13] традиционной и нагнетательной конструкций при использовании в качестве источников пневмоэнергии рассматриваемого ряда радиальных нагнетателей позволили установить условия максимальной энергоэффективности работы таких установок при максимально возможных значениях высоты подъема H, подачи эрлифта $Q_э$ и геометрического погружения смесителя h (табл. 2).

Табл. 2. Параметры традиционной и нагнетательной эрлифтных установок при абсолютном давлении во всасывающем патрубке радиального нагнетателя $p_{а\,вс}$=1,250·10^5 Па

Параметр эрлифтной установки	Ед. измерения	Тип нагнетателя				
		ЦНВ 60/1,6	ЦНВ 100/1,6	360-22-1	ЦНВ 80/3,2	ЦНВ 200/3
Максимально возможное абсолютное давление сжатого воздуха $p_{а\,н\,макс}\cdot10^{-5}$	Па	2,01	2,03	3,01	4,39	3,77
Производительность нагнетателя $Q_н$	м^3/мин (м^3/с)	69,4 (1,16)	110 (1,83)	322 (5,37)	101 (1,68)	208 (3,47)
Максимально возможное геометрическое погружение смесителя нагнетательного эрлифта $h_{макс}$	м	10,2	10,4	20,4	34,4	28,1
Относительное погружение эрлифта $\alpha_{эн}$ (при α_0=0,3)	–	0,312	0,315	0,332	0,337	0,335
Высота подъема нагнетательного эрлифта $H_н=H+\Delta H_н$	м	17,1	17,3	36,1	63,0	50,9
КПД эрлифта $\eta_э$ (при α_0=0,3) – традиционной конструкции $\eta_{эт}$ – нагнетательного эрлифта $\eta_{эн}$	–	 0,276 0,350	 0,276 0,354	 0,344 0,458	 0,431 0,578	 0,394 0,526
КПД эрлифтной установки $\eta_{эу}$ (при α_0=0,3): – традиционной конструкции $\eta_{эут}$ – нагнетательного эрлифта $\eta_{эун}$	–	 0,220 0,280	 0,234 0,299	 0,275 0,367	 0,363 0,488	 0,307 0,411
Подача эрлифта $Q_э$ (при α_0=0,3): – традиционной конструкции $Q_{эт}$ – нагнетательного эрлифта $Q_{эн}$	м^3/ч (м^3/с)	312 (0,0867) 418 (0,116)	494 (0,137) 675 (0,188)	1444 (0,401) 2225 (0,618)	454 (0,126) 723 (0,201)	932 (0,259) 1465 (0,407)

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

Выводы

Выполнен подробный анализ работы эрлифтных установок в нагнетательном режиме при использовании в их составе пяти видах радиальных нагнетателей: ЦНВ 60/1,6; ЦНВ 100/1,6; 360-22-1; ЦНВ 80/3,2; ЦНВ 200/3 производства ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования», г. Хабаровск, Российская Федерация, что обеспечивает расширение области применения эрлифтных установок.

Вычислены значения параметров, характеризующих работу нагнетательной эрлифтной установки с приведенным рядом нагнетателей в диапазоне абсолютных давлений в воздухоотделителе (во всасывающем патрубке нагнетателя) $p_{а\ вз}$=(1,013…1,250)·10^5 Па и диапазоне начальных относительных погружений смесителя α_0=(0,15…0,90).

Доказано, что в сравнении с эрлифтной установкой традиционной технологической схемы работа нагнетательной эрлифтной установки в данных условиях обеспечивает увеличение высоты подъема жидкости (гидросмеси) до 16,5 % (при α_0=0,3), увеличение подачи эрлифта на (23,1…23,6) % (во всем исследуемом диапазоне относительных погружений смесителя) при увеличении КПД эрлифта до 29,9 % (при α_0=0,9).

Для уточнения значений возможных рабочих параметров нагнетательных эрлифтных установок необходимо в аналитических исследованиях учитывать потери давления в воздухопроводе эрлифта.

Список литературы

1. Кононенко, А.П. Обоснование энергетической целесообразности применения нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями / А.П. Кононенко, Р.И. Божко // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – №1(7). – С. 11-19.
2. Кононенко, А.П. Области применения нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями / А.П. Кононенко, Р.И. Божко // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2018. – Т.14. – №1. – С. 29-37.
3. Кононенко, А.П. Теоретические диапазоны возможных подач эрлифтов с блочным воздухоснабжением центробежными нагнетателями / А.П. Кононенко, В.В. Чернюк, М.Ю. Карпушин // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна. – 2011. – Вип.22(195). – С. 116-134.
4. Папаяни, Ф.А. Энциклопедия эрлифтов / Ф.А. Папаяни [и др.]. – М.: Информсвязьиздат, 1995. – 592 с.
5. Кононенко, А.П. Опыт применения эрлифтных установок в технологических системах ТЭС / А.П. Кононенко, В.И. Мизерный, Л.Л. Глухман // Енергетика та електрифікація. – 2006. – №11. – С. 8-12.
6. Кононенко, А.П. Оптимизация параметров газожидкостных подъемников / А.П. Кононенко, Т.А. Устименко // Промислова гідравліка і пневматика. – 2010. – №3(29). – С. 51-53.
7. Кононенко, А.П. Подача эрлифтов с блочным воздухоснабжением центробежными нагнетателями / А.П. Кононенко, В.В. Чернюк, М.Ю. Карпушин // Наукові праці Донецького національного технічного університету: серія гірничо-електромеханічна. – 2012. – Вип.23(196). – С. 110-123.
8. Кононенко, А.П. Подача эрлифтных установок с источниками пневмоэнергии неизменной производительности / А.П. Кононенко, М.Ю. Карпушин // Наукові праці Донецького національного технічного університету: серія гірничо-електромеханічна. – 2012. – Вип.2(24). – С. 118-132.
9. Малеев, В.Б. Водоотлив и дегазация угольных шахт / В.Б. Малеев, В.А. Малашкина. – М.: Недра, 1995. – 208 с.
10. Тимошенко, Г.М. Теория инженерного эксперимента: Учебное пособие / Г.М. Тимошенко, П.Ф. Заря. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – 93 с.
11. Kyrychenko, Y. Advanced method for calculation of deep-water airlifts and the special software development / Y. Kyrychenko, V. Kyrychenko, A. Taturevych // Technical and Geoinformational Systems in Mining. – London: CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 2011. – P. 215-222.
12. Kyrychenko, Y. Research of dynamic processes in deep-water pumping hydrohoists lifting two-phase fluid / Y. Kyrychenko, V. Kyry chenko, A. Romanyukov // Technical and Geoinformational Systems in Mining. – London: CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 2011. – P. 115-124.
13. Modern Conception of the Hydrotransport Systems Progress in the Sea Mining / G.G. Pivnyak, E.A. Kyrychenko, V.P. Franchuk et al. // 22nd World Mining Congress & Expo, 11-16 September, 2011, Istanbul. – 2011. – Vol.3. – P. 145-152.

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

A.P. Kononenko /Dr. Sci. (Eng.)/, R.I. Bozhko
Donetsk National Technical University (Donetsk)

APPLICATION FEATURES OF RADIAL SUPERCHARGERS IN DISCHARGE AIRLIFT UNITS

Background. *In the airlifts of the traditional technological scheme, free transportation of the liquid (hydraulic mixture) from the lifting means to the consumer provided. If the geodetic mark of the user of the pumped liquid (hydraulic mixture) exceeds the maximum possible mark of the center of gravity of the outlet section of the air separator of the traditional airlift, the use of the latter becomes impossible. Discharge airlift units that provide pressure transportation of liquid (hydraulic mixture) from the air separator expand the rational scope of application of gas-liquid lifts. To implement this method of operation of the airlift, it is necessary to provide the required excess pressure in the air separator, which, however, in the traditional scheme of installation leads to a decrease in the energy efficiency of its working process.*

Materials and/or methods. *Using the developed analytical methods for the parameter analysis of the working process of a discharge airlift unit based on the comparison of the energy efficiency of the equivalent scheme of the discharge airlift and the equivalent scheme of the traditional airlift the parameters of the airlift units studied using radial superchargers as a source of pneumatic energy: CLW 60/1.6; CLW 100/1.6; 360-22-1; CLW 80/3.2, and CLW 200/3.0.*

Results. *The results of the analysis of the work of airlift units of traditional and discharge designs when using a number of radial superchargers as sources of pneumatic energy, which allowed establishing the conditions of maximum energy efficiency of such units at the maximum possible values of the height of the lift H, the supply of the airlift $Q_э$ and the geometric immersion of the mixer h, contribute to the expansion of the field of practical application of airlift units.*

Conclusion. *The values of the parameters characterizing the operation of the discharge airlift unit with the given range of superchargers in the range of absolute pressures in the air separator (in the suction nozzle of the supercharger) calculated $p_{a\ вз}=(1.013…1.250)\cdot10^5$ Pa and the range of initial relative immersions of the mixer $\alpha_0=(0.15…0.90)$ calculated. Proved that in comparison with the airlift of the traditional technological scheme, the operation of the discharge airlift in these conditions provides an increase in the height of the liquid lift (hydraulic mixture) to 16.5 % (at $\alpha_0=0.3$ mm), the increase in airlift supply (23.1…23.6) % (in the whole investigated range of relative mixer immersions) when increasing the efficiency of the airlift to 29.9 % ($\alpha_0=0.9$).*

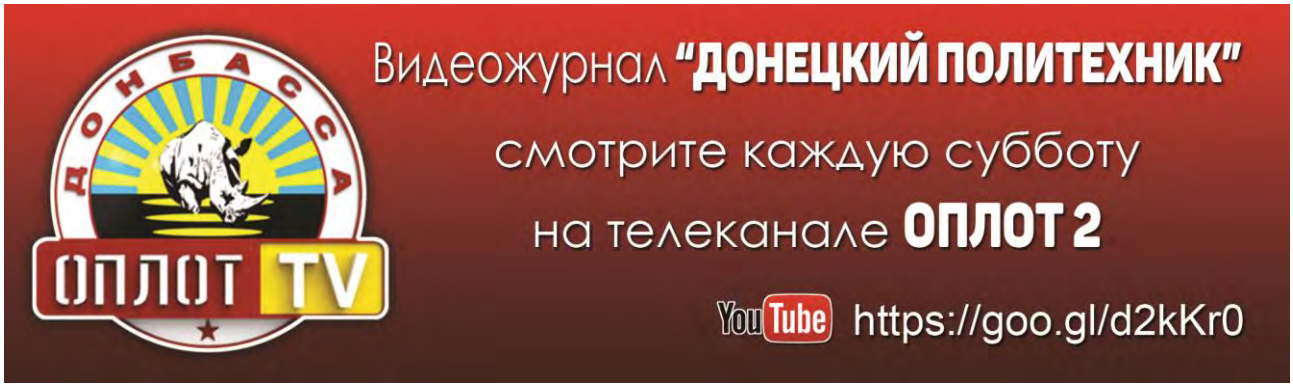
Keywords: *radial supercharger, airlift, lift height, supply, energy efficiency.*

Сведения об авторах

А.П. Кононенко
SPIN-код: 3828-6755
Телефон: +380 (71) 334-90-21
Эл. почта: ap.kononenko@mail.ru

Р.И. Божко
SPIN-код: 2510-2591
Телефон: +380 (71) 386-16-39
Эл. почта: bozhko342@mail.ru

Статья поступила 15.10.2018 г.
© А.П. Кононенко, Р.И. Божко, 2018
Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев



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

УДК 622.232.7

О.Е. Шабаев /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
А.Ю. Довгань
ГУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова» (Донецк)

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА КСП-35 В ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Экспериментально определены нагрузочные характеристики двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35, полученные при прохождении монтажного ходка на шахте им. А.Ф. Засядько. Установлены значения средней мощности на разрушение за цикл обработки забоя, фактической длительности рабочего цикла, дана оценка удельных энергозатрат разрушения забоя. Установлена значительная неравномерность значений характеристик рабочего процесса комбайна вследствие погрешностей как ручного управления, так и точности позиционирования машины в выработке, что приводит к снижению производительности и ресурса комбайна. Предложены пути совершенствования способа управления проходческим комбайном с целью повышения его эффективности, снижения переборов и повышения производительности.

Ключевые слова: *проходческий комбайн, исполнительный орган, рабочий процесс, удельные энергозатраты, производительность, мехатроника.*

Постановка проблемы

Угольная промышленность является основной сырьевой и энергетической базой для всех отраслей народного хозяйства, а каменный уголь – единственным стратегическим энергоносителем, имеющимся в недрах нашей страны. Обеспечение конкурентоспособности угольных шахт Донбасса может быть достигнуто путем роста нагрузок на очистные забои до 5 тысяч и более тонн в сутки. Основным фактором, сдерживающим рост нагрузки на современные добычные комплексы, является отставание в подготовке нового фронта очистных работ, т.е. недостаточно высокие темпы проходки при проведении подготовительных выработок.

Прохождение выработок механизированным способом при помощи проходческих комбайнов на сегодняшний день является наиболее эффективным, позволяющим уменьшить время технологических операций и повысить темпы проходки до 300 м в месяц и более. Необходимость обеспечения все более высоких темпов проходки приводит к проблеме повышения технического уровня проходческих комбайнов. Применение существующих математических моделей и методов оптимального проектирования этих машин возможно лишь при корректном задании режимов их работы, которые могут быть получены только в результате натурного эксперимента. Данные эксперимента также могут быть использованы при проверке адекватности математических моделей рабочих процессов и обосновании путей дальнейшего совершенствования проходческих машин.

Поэтому получение экспериментальных данных о фактических режимах работы двигателя исполнительного органа (ИО) проходческого комбайна, его нагруженности и затратах времени на выполнение операций при реализации технологического цикла обработки забоя стреловидным исполнительным органом проходческого комбайна является актуальной научной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций

К вопросу эффективности проходческого комбайна и управления им обращаются ученые с 80-х годов XX в. Сформулированы критерии эффективности [1,2] и подходы к конструированию как отдельных подсистем [3,4], так и комбайна в целом [5].

Энергоэффективность и максимальная производительность являются целевыми функциями в данных системах с множеством ограничительных параметров.

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

С развитием вычислительной техники изменяются требования к системам управления проходческими машинами и к проектированию новой техники. Делается упор на интеллектуальное управление с повышением количества учитываемых факторов для снижения влияния оператора на качество обработки забоя. Мехатронный подход требует одновременного проектирования силовой части и системы управления комбайном. Проходческий комбайн представляется системой взаимодействующих элементов между собой и внешними факторами среды, вносящими свой вклад в рабочий процесс [6,7].

В большинстве современных проходческих комбайнов реализованы ручные режимы управления – местный и дистанционный в зоне видимости, что ставит процесс разрушения забоя в прямую зависимость от обученности и опыта оператора. Кроме того, оператор зачастую не владеет информацией о нагрузке на двигатель исполнительного органа, эффективности процесса разрушения и может только визуально оценить границу перехода между пластом угля и породой. При таком способе управления возможно получить только средние показатели эффективности, основанные на случайном характере распределения нагрузки на электродвигатель исполнительного органа.

Цель (задачи) исследования

Целью работы является экспериментальное получение и анализ характеристик рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом проходческого комбайна, позволяющих оценить эффективность использования комбайна. Эти результаты будут использованы в дальнейшем для теоретического обоснования перспективных путей совершенствования проходческих комбайнов.

Основной материал исследования

Условия проведения эксперимента. В качестве типичного представителя комбайнов среднего типа был принят проходческий комбайн КСП-35 (рис. 1).

Исследования проводились в представительных условиях эксплуатации при прохождении проходческим комбайном КСП-35 монтажного ходка 8-й восточной лавы пл. l_4 на шахте им. А.Ф. Засядько в течение двух недель работы. Схема разработки пласта – прямой ход по комбинированной схеме разработки с повторным использованием конвейерного штрека в качестве вентиляционного.

В соответствии с паспортом проведения и крепления монтажного ходка длина выработки составляет 280 м, сечение – 17,9 м^2, угол падения пласта – 11 градусов. Выработка проводится по падению пласта с двух заходов. Пласт опасен по газу, взрывчатости угольной пыли, суфлярным выделениям метана, внезапным выбросам угля и газа, содержит включения (линзы, стяжения пирита), приток воды – до 3 м^3/час. Структура проходческого забоя, представляющая собой наслоение алевролита, угля, аргиллита и алевролита (от почвы к кровле), показана на рис. 2.

Комбайн КСП-35 питается от передвижной трансформаторной подстанции напряжением 660 В. В соответствии с паспортом комбайна КСП-35, номинальная мощность двигателя исполнительного органа составляет 132 кВт. Номинальный ток составляет 152 А (при 660 В) при $\cos\varphi=0{,}76$.

Реализация эксперимента. Для проведения эксперимента была разработана методика, в соответствии с которой в течение 288 часов (12 суток) осуществлялась непрерывная регистрация с шагом 1 с действующего значения тока двигателя, усредненного за 1 с. С целью возможности дальнейшей обработки полученных массивов данных одновременно осуществлялся хронометраж работы комбайна. За период проведения эксперимента комбайном было пройдено 60,0 м выработки (соответственно посуточно – 5 м/сут.).

Пример реализации тока двигателя приведен на рис. 3. На рисунке представлен цикл разрушения массива комбайном КСП-35 во вторую смену 15.11.2016 г. Уставка технологического перегруза установлена на значении 173 А, ток опрокидывания составляет 360 А, уставка максимальной токовой защиты – 1730 А.

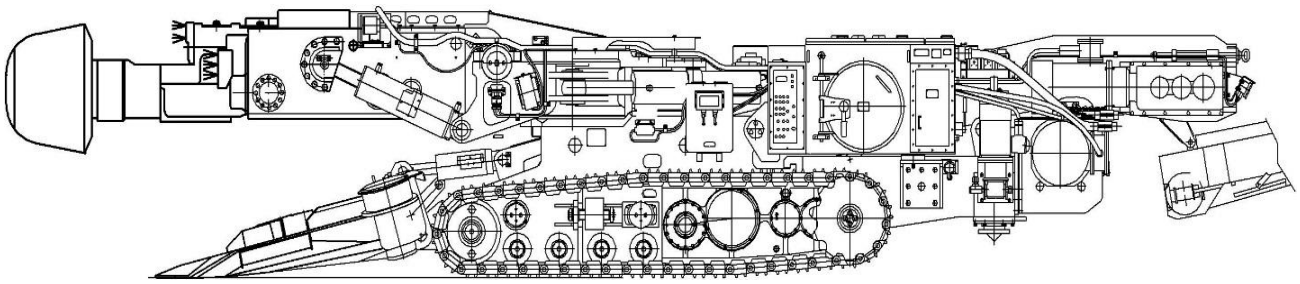


Рис. 1. Проходческий комбайн КСП-35

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

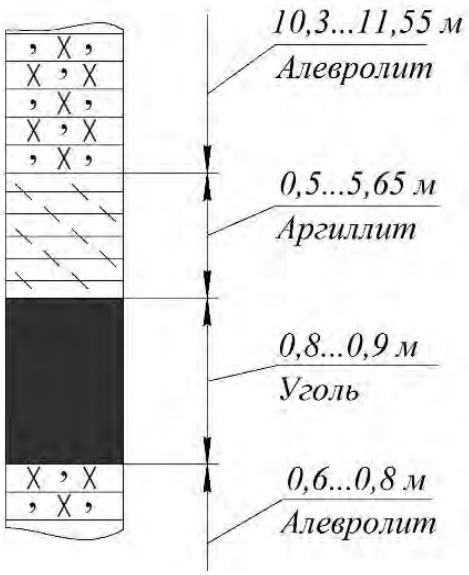


Рис. 2. Структура пород проходческого забоя

На рис. 3 овалами отмечены зоны свободного вращения исполнительного органа без нагрузки, которые не учитываются при определении времени цикла обработки забоя и, соответственно, среднего тока нагрузки ИО для каждого цикла.

Для каждого цикла ток холостого хода I_{xxi} определен отдельно и составляет от 31,5 А до 35,3 А. Разброс значений тока I_{xxi} обусловлен колебанием напряжения сети в разные дни.

При обработке массива данных значений тока двигателя исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 получены дискретные значения тока с равным шагом 1 с, которые впоследствии использованы для определения средних и экстремальных значений. Для каждого цикла обработки забоя по полученным характеристикам определены следующие параметры:

$T_{факті}$ – фактическое время цикла;

i – индекс, соответствующий номеру цикла;

$T_{рабі}$ – время цикла обработки забоя за вычетом времени простоя и холостого хода;

I_{xxi} – ток т.н. холостого хода при вращении ИО комбайна без нагрузки;

I_{cpi} – средний ток соответствующего цикла и смены без учета I_{xxi} во время простоя.

Полученные значения параметров времени цикла, среднего тока и исходные паспортные данные комбайна КСП-35 позволяют определить мощность комбайна, расходуемую на разрушение массива:

$$P_i = \sqrt{3}\left(I_{cpi} - I_{xx_{i\,\min}}\right) \cdot \frac{P_{ном}}{I_{ном} \cdot \eta_\Sigma} \cdot \cos\left(\varphi(I)\right), \quad (1)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность двигателя исполнительного органа; η_Σ=0,8 – суммарный КПД исполнительного органа, учитывающий КПД двигателя и редуктора ИО; $\cos(\varphi(I))$ – зависимость коэффициента мощности двигателя от полного тока, полученная экспериментально для данного двигателя.

С учетом выражения (1) для каждого цикла обработки забоя определяется значение удельных энергозатрат на разрушение забоя, кВтч/м^3:

$$W_i = \frac{P_i \cdot T_{раб_i}}{S \cdot B \cdot 60}, \quad (2)$$

где S=17,9 м^2 – сечение выработки; B=0,5 м – глубина зарубки.

Для определения теоретической производительности проходческого комбайна в функции мощности привода исполнительного органа используется зависимость:

$$W_i = \frac{P_i}{Q}. \quad (3)$$

Результаты эксперимента. С использованием специализированного программного обеспечения были получены характеристики рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом проходческого комбайна КСП-35.

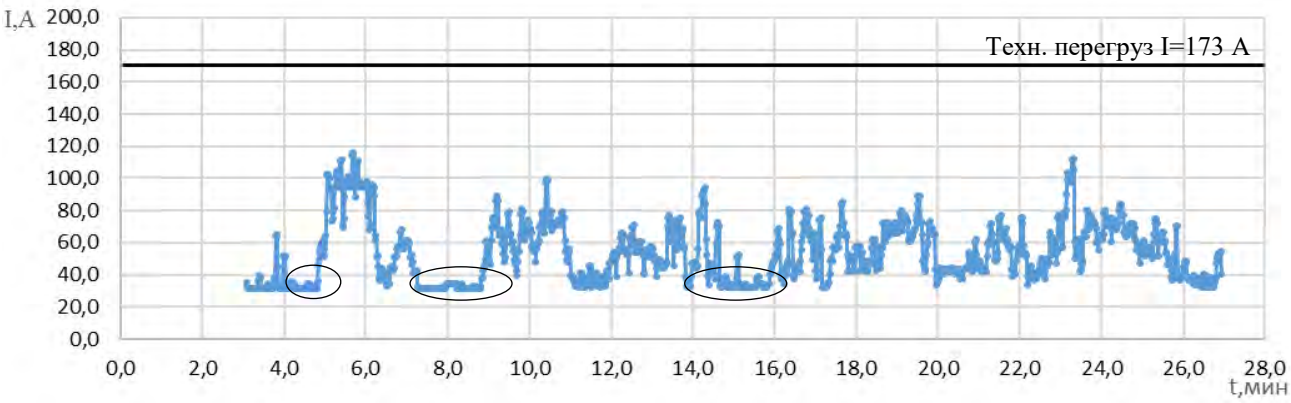


Рис. 3. Фрагмент записи тока двигателя за цикл обработки забоя комбайном КСП-35

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

На рис. 4 представлена гистограмма распределения средней мощности электродвигателя исполнительного органа P_i комбайна КСП-35, используемой за полный цикл разрушения забоя. Рассмотрено 33 цикла во вторую, третью и четвертую смены.

Как видно из рис. 4, разброс используемой мощности электродвигателя ИО при разрушении забоя составляет от 32,01 кВт до 77,10 кВт.

С использованием выражения (2) найдены значения удельных энергозатрат разрушения забоя W_i для i-го цикла. На рис. 5 представлена гистограмма значений W_i для 33-х циклов обработки забоя.

Удельные энергозатраты характеризуют эффективность процесса разрушения забоя с учетом крепости разрушаемой породы, структуры забоя, конструкции исполнительного органа и конструкции режущего инструмента, а также режимных параметров (скорости подачи, резания, глубины зарубки и шага фрезерования исполнительного органа [8]) и перебора породы по контуру выработки. Проходческий комбайн КСП-35 имеет местный и дистанционный режимы управления. Однако эффективность обработки забоя зависит в большей мере от умений оператора.

Как видно из гистограммы рис. 5, колебание значений удельных энергозатрат на цикл обработки забоя значительно, минимальное значение составляет 0,5 кВтч/м^3, а максимальное – 2,0 кВтч/м^3, то есть в 4 раза больше. Данный разбег значений также свидетельствует о недостаточно эффективном управлении машиной. Одним из путей обеспечения стабильно минимальных значений удельных энергозатрат является применение мехатронного подхода при проектировании проходческого комбайна. Анализируя целый ряд параметров, автоматизированная система управления позволяет подобрать оптимальный алгоритм воздействий на исполнительный орган для максимального использования мощности электродвигателя и достижения максимальной производительности при минимальных энергозатратах.

В соответствии с паспортом проходческий комбайн КСП-35 обладает технической производительностью резания не менее 0,7 м^3/мин при $\sigma_{сж}$=60 МПа и не менее 0,45 м^3/мин при $\sigma_{сж}$=80 МПа. На рис. 6 представлено поле значений производительности процесса разрушения забоя в зависимости от удельных энергозатрат и коэффициента использования мощности.

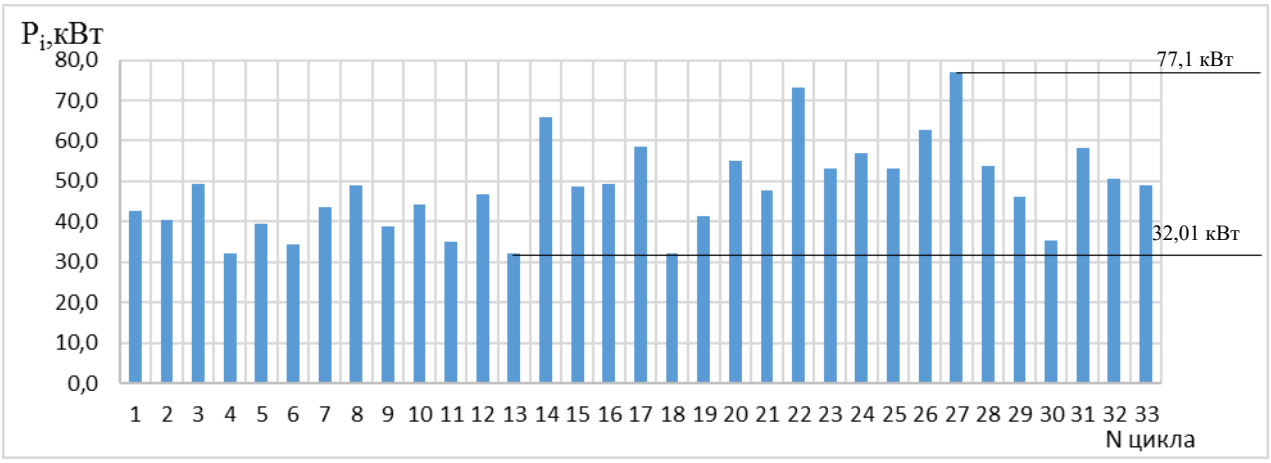


Рис. 4. Значения средней мощности P_i за цикл разрушения забоя

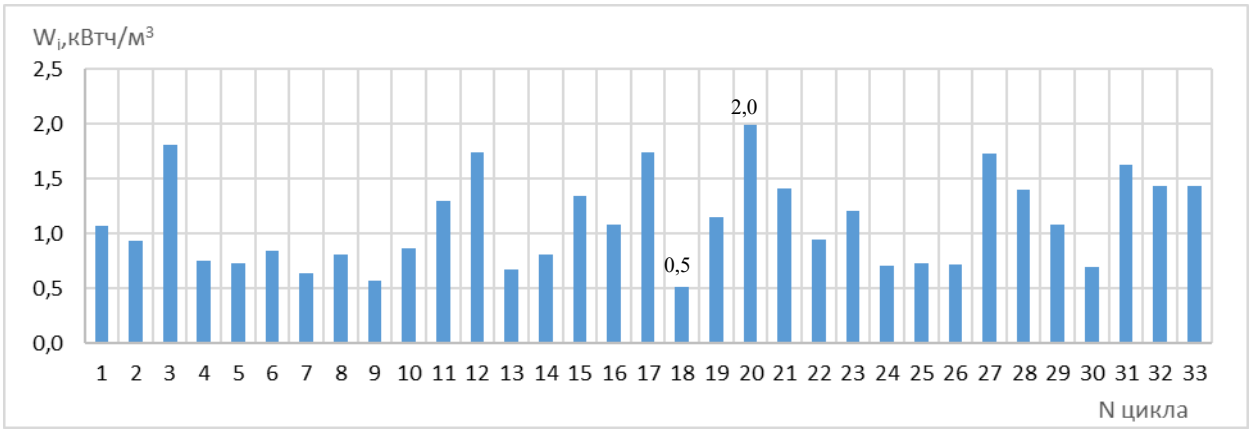


Рис. 5. Удельные энергозатраты на разрушение массива проходческим комбайном КСП-35

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

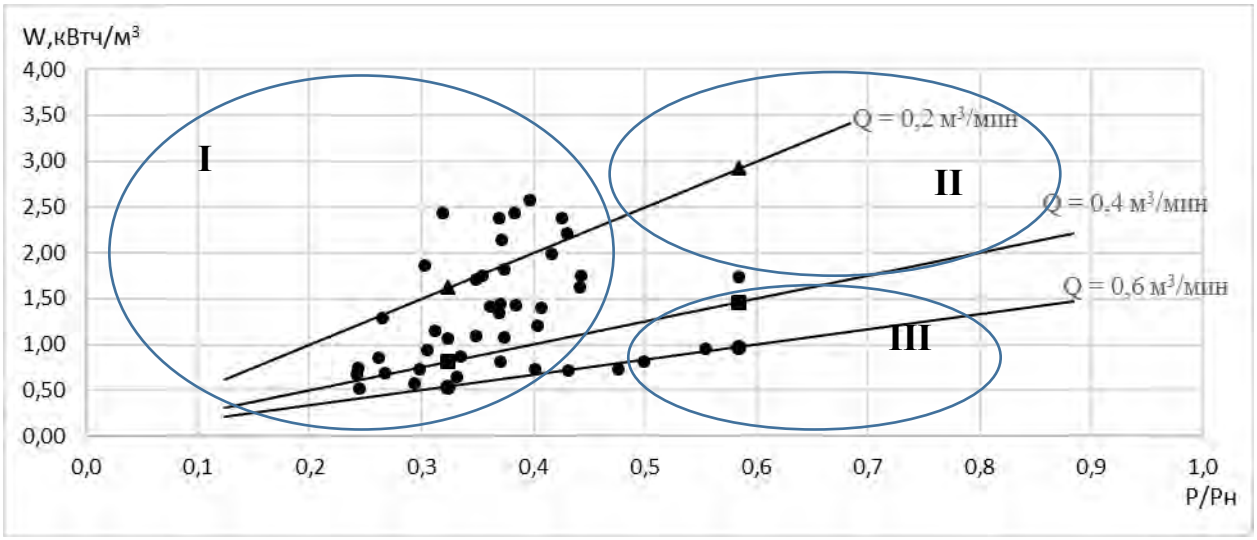


Рис. 6. Поле значений производительности процесса разрушения забоя за цикл

Как видно из рис. 6, большинство значений производительности Q_i попадает в область I, характеризующуюся высокими энергозатратами из-за неэффективного режима разрушения забоя при низкой эффективности использования мощности электродвигателя.

Применение автоматизированной системы управления проходческим комбайном с соответствующим набором датчиков и гибким алгоритмом управляющих воздействий, учитывающего также схему обработки забоя, особенности конструкции, схемы управления и инерционность гидравлики, позволит выйти на рациональные параметры режима разрушения забоя и максимально использовать мощность двигателя, что будет соответствовать зоне III, представленной на графике рис. 4.

В работе [1] сформулированы критерии максимальной производительности проходческого комбайна по току:

$$I_c(t) = I_{\max}(t),$$

$$I_н \le I_{\max}(t) \le I_{зо}(t) - I_д(t) - I_T(t) - I_U(t), \quad (4)$$

$$I_c(t) = I_{зо}(t),$$

$$0{,}7I_н(t) \le I_{зо}(t) \le I_н(t), \quad (5)$$

$$T_ф \le T,$$

где $I_c(t)$ и $I_{\max}(t)$ – среднесменное и максимально допустимое среднее значение тока нагрузки электропривода исполнительного органа; $I_н$ – номинальное паспортное значение тока электродвигателя ИО; $I_{зо}(t)$ – заданное максимально допустимое по условиям динамичности нагрузки среднее значение тока; $I_д(t)$ – среднее значение динамической составляющей тока нагрузки; $I_T(t)$ – среднее значение составляющей тока нагрузки, учитывающее технологические ограничения по скорости подачи ИО; $I_U(t)$ – среднее значение составляющей тока нагрузки, обусловленное колебаниями напряжения питающей сети.

Критерии (4) и (5) характеризуют основные режимы работы проходческой машины, в том числе с технологическими ограничениями, когда максимальное значение нагрузки не превышает ее номинала. Регулятор нагрузки, реализующий критерий максимальной производительности по нагрузке, в составе системы управления с обратными связями по току способен устранить влияние человеческого фактора при обработке забоя по заложенной схеме, что, в свою очередь, позволит повысить энергоэффективность комбайна и его производительность.

Еще одним направлением повышения эффективности обработки забоя проходческим комбайном является программное управление разрушением массива. Время обработки забоя состоит из нескольких составляющих, являющихся следствием инерционности в работе комбайна.

Одним из недостатков комбайна является его смещение во время работы, которое приводит к переборам и необходимости дополнительных работ по забутовке. При достижении коэффициента переборов β=1,054 при крепости пород f>3…4 сокращается время крепления выработки до 20 % [9]. На величину смещения комбайна влияют следующие факторы: крепость пород обрабатываемого забоя, крепость пород почвы выработки, влажность почвы, кливаж почвы по осям выработки. Система управления, учитывающая факторы смещения стрелы исполнитель-

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

ного органа в координатах проходческого забоя, позволяет уменьшить переборы по сечению выработки и свести к минимуму вспомогательные операции по подготовке забоя к креплению.

Выводы

Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации позволили выявить значительную неравномерность значений характеристик рабочего процесса комбайна вследствие погрешностей ручного управления (значение средней мощности двигателя исполнительного органа за цикл обработки забоя находится в пределах 32,01…77,1 кВт, а удельные энергозатраты – в пределах 0,52…2,57 кВтч/м^3). В результате, имеют место отклонения от рациональных режимов обработки забоя, перебор породы по контуру выработки, недостаточное использование мощности привода, что приводит к существенному снижению производительности и ресурса комбайна.

Повышение эффективности проходческого комбайна в современных условиях постоянного повышения темпов прохождения выработки при сокращении длительности вспомогательных операций может быть реализовано на основе мехатронного подхода, который бы стал симбиозом интеллектуальной системы управления и эффективной силовой части для разрушения горного массива с минимальными удельными энергозатратами, минимальными переборами и максимальной производительностью. Необходимо понизить степень зависимости эффективности обработки забоя от субъективного участия оператора в выработке корректирующих и управляющих воздействий на основе опыта, обученности или визуальной оценки ситуации.

Список литературы

1. Войтюк, К.К. Оптимизация управления нагрузкой проходческих машин по критерию максимальной производительности // Автоматизация забойного оборудования: сб. научн. тр. №9. – М.: НПО «Автоматгормаш», 1984. – Вып.9. – С. 61-73.
2. Литвинский, Г.Г. Критерии оценки технического уровня горной техники / Уголь Украины. – 2015. – №9. – С. 41-46.
3. Кондрахин, В.П. Оптимизация параметров подсистемы «исполнительный орган» проходческого комбайна КСП-32 / В.П. Кондрахин, В.А. Тарасенко, А.И. Хиценко // Наукові праці ДонНТУ. – 1999. – Вып.99. – С. 121-129.
4. Halama, A. Wireless control and directional navigation of a roadheader in drilling process / A. Halama, P. Loska, P. Szymała // Pomiary Automatyka Robotyka. – 2013. – No.2. – P. 218-223.
5. Оценка эффективности проходческого комбайна с интеллектуальной системой «Управление-подача» исполнительного органа / О.Е. Шабаев [и др.] // Донецк: ДонНТУ, 2009. – 15 с.
6. Jasiulek, D. Mechatronic systems in mining roadheaders-examples of solutions / D. Jasiulek, J. Świder // Pomiary Automatyka Robotyka. – 2013. – No.1. – P. 123-127
7. О стратегии создания интеллектуальных роботизированных систем управления горношахтным оборудованием / В.Г. Курносов [и др.] // Уголь Украины. – 2014. – №1. – С. 12-16.
8. Шабаев, О.Е. Принципы интеллектуализации рабочих процессов мехатронной горной выемочной машины / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко // Вісті Донецького гірничого ін-ту. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – №1. – С. 68-77.
9. Злодеев, А.В. Повышение эффективности программной обработки забоя стреловыми комбайнами / А.В. Злодеев, В.В. Синенко, С.Е. Шумалинский //Автоматизация забойного оборудования: сб. научн. тр. – М.: НПО «Автоматгормаш», 1984. – Вып.9. – С. 57-60.

O.Ye. Shabaev /Dr. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
A.Yu. Dovgan
Avtomatgormash named after V.A. Antipov (Donetsk)

STUDY OF LOAD CHARACTERISTICS OF THE MOTOR DRIVE OF THE WORKING BODY OF KSP-35 ROADHEADER

Background. *The coal industry is the main raw material and energy base for all sectors of the economy, and coal is a strategic energy resource. To increase the load on the breakage faces up to 5 thousand tons per day, it is necessary to ensure high rates of preparatory workings. Real data on the modes of operation of roadheaders can be obtained only as a result of a full-scale experiment and used to confirm the developed mathematical models.*

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

Materials and/or methods. *Studies carried out in representative operating conditions during the KSP-35 passing of assembly stroke. During 288 hours (12 days, 33 full cycles of face treatment) continuous registration with step 1 from the current value of the drive motor of the working body averaged for 1 s carried out. For each cycle, according to the obtained data, the duration of the face treatment cycle, the coefficient of machine time and the average current of the motor drive of the working body, defined, also set the average power and the value of specific energy consumption in the process of the face destruction.*

Results. *A significant unevenness of the values of the characteristics of the working process of face destruction by KSP-35 working body revealed: the power spread during the destruction of the face is 32...77 kW, and the specific energy consumption is from 0.5...2.0 kWh/m^3. The field of values of theoretical productivity of the roadheader in function of power inputs and coefficient of the power utilization rate built. The analysis of these data showed that the reasons for the low productivity are both the insufficient use of power and inefficient mode of destruction of the face. The ways of improving the method of control of the roadheader in order to increase the efficiency of its operation, reduce excess rock and increase productivity.*

Conclusion. *Experimental studies of the load characteristics of the drive motor of the KSP-35 working body in representative conditions of its operation allowed revealing a significant unevenness of the values of the characteristics of the working process of the roadheader due to errors of manual control and insufficient positioning accuracy. Application of mechatronic approach to roadheaders design will allow working with rational parameters of the mode of destruction of a face, excluding excess of rock and as much as possible using the power of the engine on the basis of adaptive optimization of the roadheader working process.*

Keywords: *roadheader, working body, working process, specific energy consumption, productivity, mechatronics.*

Сведения об авторах

О.Е. Шабаев
SPIN-код: 1447-2343
ORCID iD: 0000-0002-0845-7449
Телефон: +380 (95) 429-13-32
Эл. почта: oeshabaev@ya.ru

А.Ю. Довгань
SPIN-код: 5834-1547
Researcher ID: L-1788-2018
ORCID iD: 0000-0001-7154-4513
Телефон: +380 (95) 755-29-58
Эл. почта: agm_osu@mail.ru

Статья поступила 15.10.2018 г.
© О.Е. Шабаев, А.Ю. Довгань, 2018
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин



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

УДК 621.311.426-213.34

К.Н. Маренич /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
И.Я. Чернов /к.т.н./, Е.В. Золотарев
ГУ «Научно-исследовательский институт взрывобезопасного электрооборудования» (Донецк)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ВНУТРИ ОБОЛОЧКИ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ ТИПА КТПВ-1000 МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

На основании применения метода конечных элементов обоснована и проанализирована структура объемной модели тепловых процессов в шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции высокой мощности, что позволило учесть неравномерности объемного тепловыделения и уточнить тепловое состояние подстанции и отдельных ее компонентов. Обоснована область применения данного способа моделирования.

Ключевые слова: *взрывобезопасная трансформаторная подстанция, математическая модель, тепловое поле.*

Постановка проблемы

Одним из ключевых вопросов при разработке современных шахтных комплектных трансформаторных подстанций (КТП), в особенности повышенных мощностей (1000 кВ·А и выше), является вопрос обеспечения эффективного охлаждения их активной части (АЧ). Превышение температуры АЧ КТП выше допустимой – основная причина, ограничивающая их мощность.

Изучение процессов теплообмена внутри оболочки взрывобезопасной КТП на стадии предварительного проектирования позволит решить задачу оценки теплового поля с учетом влияния таких факторов:

– собственных конструктивных и электромагнитных особенностей активной части;

– конструктивных особенностей взрывозащищенной оболочки;

– учета различных режимов работы КТП (определение допустимой продолжительности аварийных перегрузок).

Решение этой задачи исключительно экспериментальным путем требует весьма значительных затрат времени и материальных средств, связанных с изготовлением опытных образцов и проведением их длительных исследований. Поэтому разработка математической модели процессов нагревания и охлаждения шахтной КТП с учетом влияния всех вышеперечисленных факторов, определяющих перенос процесса оценки теплового поля подстанции из натурной плоскости в виртуальную, является актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ современных аналитических методов тепловых исследований показывает, что оценку эффективности систем охлаждения шахтной КТП можно выполнить одним из трех способов:

– посредством инженерного расчета на базе эмпирических, опытно установленных зависимостей для конкретных конструкций;

– путем анализа эквивалентных тепловых схем замещения методом вариации параметров в любом из доступных SPICE-вычислителей, например, в симуляторе LTspice;

– численным моделированием, основанным на методе конечных элементов (МКЭ), с применением программных продуктов Ansys, Comsol Multiphysics, SolidWorks и др.

Цель (задачи) исследования

Целью статьи является обоснование корректного способа математического моделирования процесса конвективного теплообмена внутри оболочки шахтной подстанции, обеспечивающего получение точной информации о ее тепловом состоянии, включая ее функциональные элементы в стационарном и переходных режимах с учетом совокупности возмущающих факторов в реальных диапазонах их изменения.

Для достижения этой цели предполагается воспользоваться методологией конечных элементов (МКЭ) в среде SolidWorks Flow Simulation и выполнить сравнительный анализ полученных результатов с данными экспериментальных тепловых исследований

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

подстанции типа КТПВ-1000/6-1,2, опубликованных в [1…5].

Основной материал исследования

Метод конечных элементов основан на представлении реальной конструкции объекта ее 3D-моделью, которая разбивается на некоторое число малых подобластей, в каждой из которых произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции решаемого дифференциального уравнения, что позволяет эффективно оценить влияние различных конструктивных, технологических, теплофизических и эксплуатационных факторов на тепловой режим конструкции [6,7].

В соответствии с этим методом представим шахтную трансформаторную подстанцию в виде 3D-модели, состоящей из семи однородных тел (рис. 1). Этими телами являются: обмотки высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений, электроизоляционные цилиндры, магнитопровод, ярмовые балки, воздух внутри взрывонепроницаемой оболочки и сама оболочка КТП. Все расчетные составные части модели соответствуют подстанции типа КТПВ-1000/6-1,2. Источником теплового потока в процессе работы взрывозащищенной КТП являются объемные тепловыделения в материалах, которые для номинального режима нагрузки определяются по формуле:

$$\Sigma Q = \Sigma P_{КТП} = P_{XX} + P_{КЗ} + P_{ДОБ}\ , \text{Вт},$$

где $\Sigma P_{КТП}$ – суммарные потери активной мощности при работе КТП, Вт; P_{XX} , $P_{КЗ}$ – потери мощности холостого хода и короткого замыкания АЧ, Вт; $P_{ДОБ}$ – добавочные потери, возникающие в результате воздействия вихревых токов в металлических конструкционных элементах КТП (ярмовые балки, стяжные шпильки АЧ и др.), а также непосредственно в стальной взрывонепроницаемой оболочке подстанции.

Очевидно, что весь тепловой поток, возникающий в указанных выше источниках, должен быть отдан внешней поверхностью оболочки в окружающее воздушное пространство, т.е.:

$$\Sigma Q = Q_{ОТД}\ , \text{Вт},$$

где $Q_{ОТД}$ – тепловой поток, отдаваемый внешней поверхностью оболочки КТП в окружающее пространство, Вт.

Для уменьшения объема вычислений из модели целесообразно исключить конструкционные элементы, не оказывающие существенного влияния на характер теплообмена (фаски, технологические отверстия, ребра жесткости, элементы крепления АЧ и обмоток и др.). Модель выполнена в программном комплексе SolidWorks с использованием дополнения Flow Simulation.

При составлении расчетной математической модели введем ряд допущений:

– коэффициенты теплоотдачи составных (твердых) тел модели не зависят от температуры и имеют характеристики, представленные в таблице 1;

– распределительные устройства КТП в рассеивании тепла участия не принимают;

– добавочные потери, возникающие в конструкционных элементах КТП, могут не учитываться;

– принимаем, что весь тепловой поток передается внутренней поверхности оболочки только путем конвективного теплообмена.

Математической моделью для поставленной задачи является уравнение теплопередачи при условии теплообмена посредством теплопроводности и конвекции:

$$Q_У = \rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T + \rho \cdot C_p \cdot T \cdot \vec{u})\ ,$$

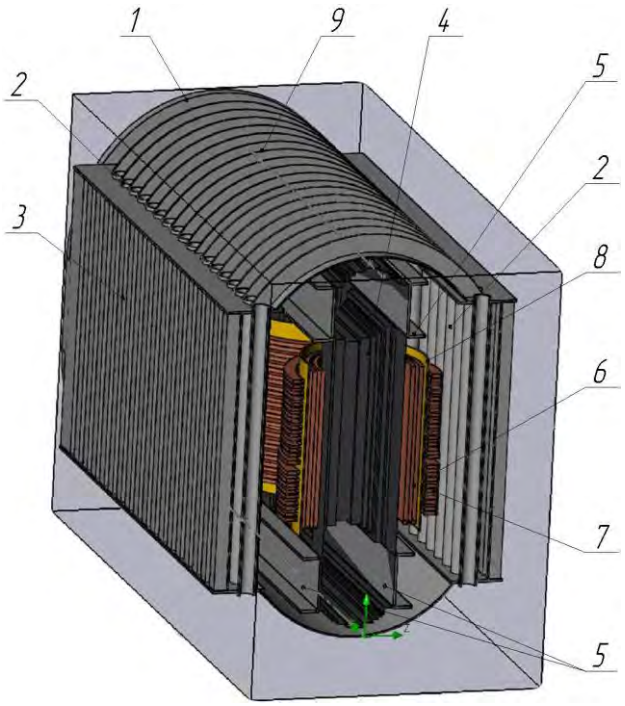


Рис. 1. Упрощенная 3D-модель объекта исследования:
1 – взрывонепроницаемая оболочка;
2 – трубы системы охлаждения;
3 – гофрированная стенка;
4 –магнитопровод; *5* – ярмовые балки;
6 – обмотка НН; *7* – обмотка ВН;
8 – изоляционный цилиндр; *9* – ребра корпуса

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

Табл. 1. Характеристика материалов, используемых в расчетной модели

Наименование материала	Характеристика			
	Плотность, кг/м^3	Тепло-емкость, Дж/(кг·К)	Тепло-проводность, Вт/(м·К)	Применение в модели
Сталь электротехническая	7800	480	36	Магнитопровод
Медь обмоточная	8900	390	392	Обмотки ВН и НН
Сталь углеродистая конструкционная Ст.3	7850	460	45	Взрывонепроницаемая оболочка Ярмовые балки АЧ
Стеклотекстолит СТЭФ-1	1700	1200	0,3	Электроизоляционный цилиндр

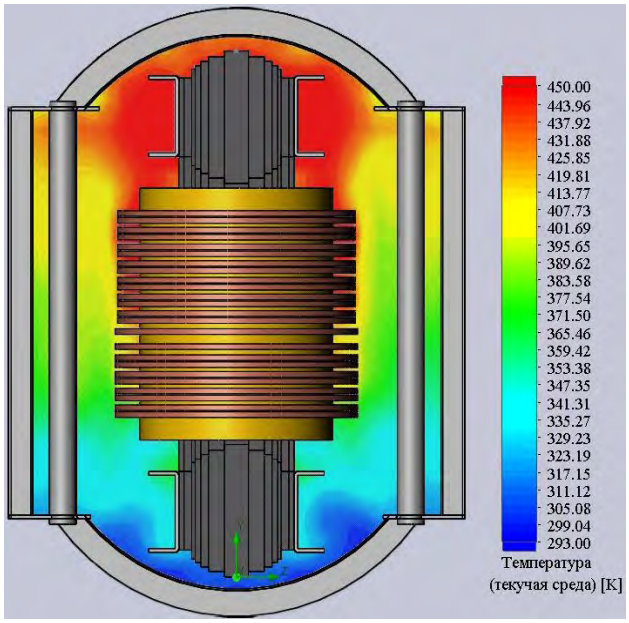


Рис. 2. Срез теплового поля в поперечном сечении фазы В

где ρ – плотность, кг/м^3; C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении Дж/(кг·К); T – температура, К; t – время, с; k – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $\vec{u}$ – вектор скорости движения воздуха, м/с; Q_y – удельный источник или потребитель теплоты, Вт/м^3; ∇ – векторный дифференциальный оператор, компоненты которого являются частными производными по координатам (оператор набла):

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial x}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial x}\vec{k},$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы по осям x, y, z соответственно.

Исходные данные для расчета:

1. Источники тепла – обмотки ВН и НН: потери короткого замыкания при 115 °С $P_{КЗ}$=6500 Вт; потери холостого хода P_{XX}=2700 Вт;

Соответственно, удельные тепловыделения в обмотках и магнитопроводе определяем по формулам:

$$Q_{yCu} = \frac{P_{K3} \cdot m_{Cu}}{\rho_{Cu}}, \text{ Вт/м}^3,$$

$$Q_{yFe} = \frac{P_{XX} \cdot m_{Fe}}{\rho_{Fe}}, \text{ Вт/м}^3,$$

где m_{Cu}, m_{Fe} – масса меди в обмотках ВН и НН и стали в магнитопроводе соответственно (m_{Cu}= =926,5 кг; m_{Fe}=1902,4 кг) ρ_{Cu}, ρ_{Fe} – плотности соответственно меди и стали магнитопровода (см. табл. 1).

$$Q_{yCu} = 676{,}6 \text{ Вт/м}^3,$$

$$Q_{yFe} = 658{,}5 \text{ Вт/м}^3.$$

2. Граничные условия: температура окружающей среды T_0=293,2 К; атмосферное давление P_0=101325 Па; тепловое условие на внешней стенке оболочки задано коэффициентом теплоотдачи равным α=7,9 Вт/(м^2·К) [6].

Расчет выполняем для стационарного (установившегося) теплового режима. Результаты расчета представлены на рис. 2…6. На рис. 2, 3 представлен срез теплового поля в поперечном сечении фазы В и продольном сечении подстанции соответственно.

Сравнение полученных градиентов температур с экспериментальными данными показало, что в верхней части оболочки данные в целом близки. Так, над верхним ярмом магнитопровода, напротив фазы В фактическое превышение температуры воздуха составляет 177 °С, тогда как расчетные данные составляют 163 °С (Δ=7,9 %).

Сравнение расчетных и экспериментальных данных превышения температуры внутри осевого канала обмотки НН представлено на рис. 4.

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

В нижней 1/3 части и вверху канала температурное поле имеет минимальную погрешность, а в точке максимального перегрева разница доходит до 20 °С (Δ_{max}=11,6 %).

Особый интерес представляют расчетные данные траекторий движения конвективных потоков воздуха по объему оболочки, с отображением температуры (рис. 5).

Исходя из формулы Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha \cdot (T_v - T_n) \cdot S \text{, Вт,}$$

количество теплоты Q, которое отводится от поверхности с площадью S, напрямую зависит от разности температуры воздуха внутри оболочки и температуры на поверхности оболочки [8].

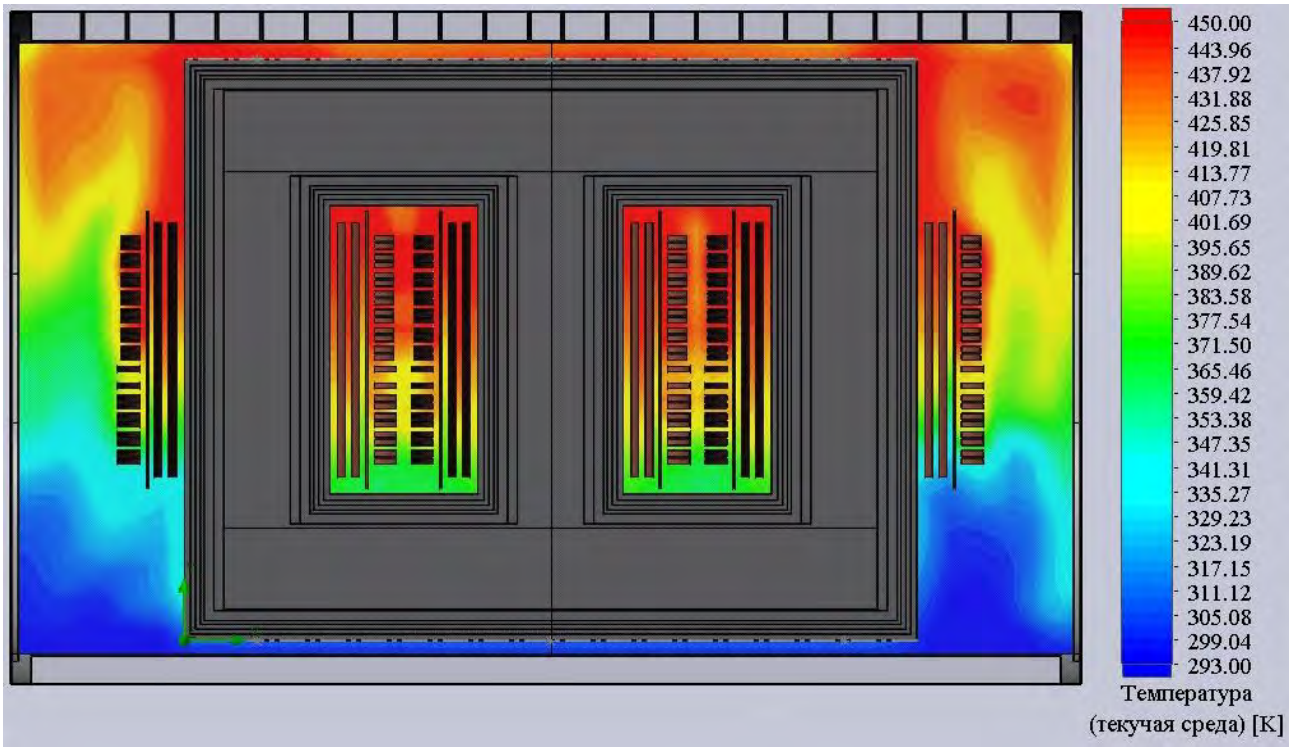


Рис. 3. Срез теплового поля в продольном сечении по центру модели

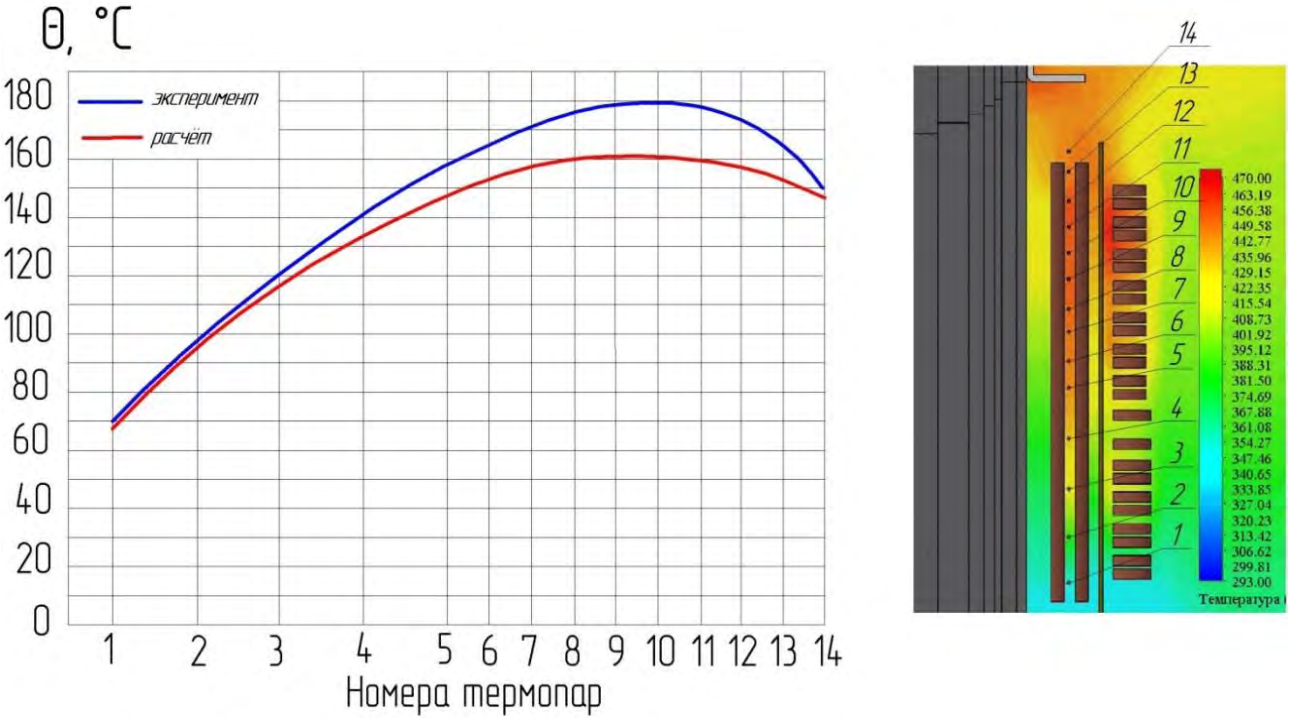


Рис. 4. График распределения превышения температуры по высоте осевого канала обмотки НН фазы В, при экспериментальных исследованиях и расчете

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

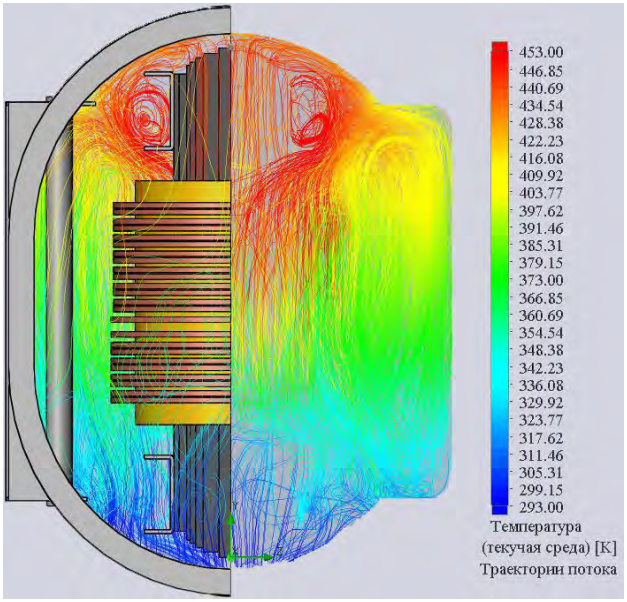


Рис. 5. Траектории движения конвективных потоков воздуха по объему оболочки с отображением температуры

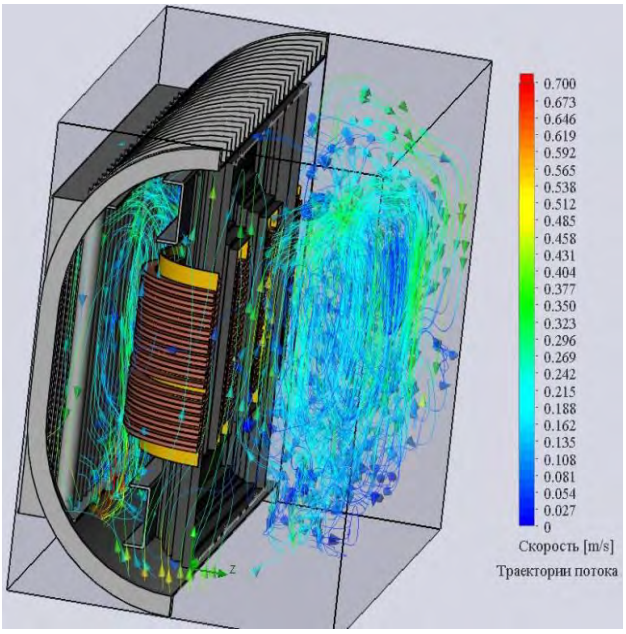


Рис. 6. Траектории движения конвективных потоков воздуха по объему оболочки с отображением скорости

Очевидно, что наибольшую эффективность в плане теплообмена имеет верхняя треть оболочки, где разность этих температур максимальна.

На рис. 6 представлен расчет траекторий движения конвективных потоков воздуха по объему оболочки с отображением их скорости. Результаты расчета соотносимы с экспериментальными данными для взрывозащищенных трансформаторов типа ТСВ, где измеренные скорости внутри оболочки находятся в диапазоне 0,2…1,5 м/с [9].

Выводы

Расчет процесса конвективного теплообмена внутри оболочки шахтной КТП, основанный на методе конечных элементов в среде SolidWorks Flow Simulation, может быть использован на стадии эскизного проектирования для предварительной оценки теплового состояния взрывозащищенных трансформаторных подстанций.

Уточнение параметров динамики тепловых процессов в КТП на этапе компьютерного моделирования достигается за счет учета свойств изоляционных и пропиточных материалов, учета неравномерности объемного тепловыделения в обмотках АЧ, учета тепловыделения в монтажных и крепежных элементах конструкции при рассеянии магнитного потока, учета условий теплообмена за счет лучеиспускания, а также учета конвекции хладагента от внешней стенки оболочки в окружающее пространство.

Список литературы

1. Сорока, Е.А. Совершенствование системы охлаждения взрывозащищённых трансформаторов на стадии НИР и серийного производства / Е.А. Сорока, Ю.Н. Папазов // Наукові праці ДонНТУ. – 2011. – №10. – С. 167-176.
2. Исследование и сравнительный анализ стационарного температурного поля оболочек трансформаторных подстанций типа КТПВ мощностью 1000 и 1250 кВ·А / Е.А. Сорока, Е.В. Золотарев, Е.Н. Калач и др. // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2005. – С. 59-68.
3. Исследование теплового состояния и механической прочности корпусов взрывозащищенных комплектных трансформаторных подстанций повышенной мощности / И.Я. Чернов, В.М. Грушко, О.Е. Никитин и др. // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2009. – С. 68-80.
4. Чернов, И.Я. Анализ теплового состояния взрывонепроницаемых кожухов трансформаторных подстанций / И.Я. Чернов, В.В. Шилов, Н.В. Бурковская. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2005. – С. 72-77.
5. Сорока, Е.А. Влияние оболочки взрывозащищенного трансформатора на тепловое состояние его активной части / Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2009. – С. 81-87.

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

6. Иванков, В.Ф. Электротепловые расчётные модели элементов конструкции трансформаторного оборудования / В.Ф. Иванков, А.В. Басова, Н.В. Шульга // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – №2. – С. 41-53.
7. Traidia, A. Multiphysics modeling and numerical simulation of GTA weld pools [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00709055/document
8. Василенко, С.М. Основи тепломасообміну / С.М. Василенко, А.І. Українець, В.В. Олішевський // Київ: НУХТ, 2004. – 243 с.
9. Сорока, Е.А. Теплоотдача в охлаждающих каналах оболочки взрывозащищенного трансформатора типа ТСВ / Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк, 1994. – С. 58-79.

K.N. Marenich /Dr. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
I.Y. Chernov /Cand. Sci. (Eng.)/, Y.V. Zolotarov
Scientific-Research, Project-Designing and Technological Institute of Explosion-Proof and Mine Electrical Equipment (Donetsk)

MODELING OF HEAT TRANSFER PROCESSES INSIDE THE SHELL OF AN EXPLOSION-PROOF TRANSFORMER SUBSTATION OF KTPV-1000 BY FINITE ELEMENTS METHOD

Background. *Based on the general equation of convective heat transfer (Fourier – Kirchhoff equation), a mathematical model of heat transfer inside the shell of an explosion-proof mine transformer substation developed. The model is calculated by the finite elements method in SolidWorks Flow Simulation software environment. A comparative analysis of the obtained results and the data of experimental thermal studies of a KTPV-1000/6-1.2 substation performed.*
Materials and/or methods. *The substation model represented by high and low voltage windings, electrically insulating cylinders, magnetic core, yoke beams, explosion-proof sheath, and internal airspace. Volumetric heat generation of no-load losses and short circuit losses of the transformer in the nominal mode of operation at 115 °C taken as a source of heat flow. The boundary conditions on the outer wall of the shell preset by the heat transfer coefficient.*
Results. *The simulation results are comparable with experimental data. The maximum value of the relative error of air temperature in the upper 1/3 of the shell is Δ=7.9 %, – at the point of maximum overheating of the ventilation axial channel of the low voltage winding (phase B) Δ=11.6 %.*
Conclusion. *Shown that the presented calculation method is generally correct. The results of such a calculation can be used at the stage of preliminary design, for a preliminary assessment of the thermal state of the mine explosion-proof transformer substations.*

Keywords: *explosion-proof transformer substation, mathematical model, thermal field.*

Сведения об авторах
К.Н. Маренич
SPIN-код: 8632-8425
Author ID: 377905
ORCID iD: 0000-0002-6309-4986
Телефон: +380 (71) 301-98-61
Эл. почта: knm@donntu.org
Е.В. Золотарёв
Телефон: +380 (71) 412-10-54
Эл. почта: transformator76@inbox.ru
И.Я. Чернов
Телефон: +380 (71) 348-03-55
Эл. почта: kniot_i_tp@mail.ru

Статья поступила 17.10.2018 г.
© К.Н. Маренич, И.Я. Чернов, Е.В. Золотарёв, 2018
Рецензент д.т.н., проф. Э.Г. Куренный

УДК 621.31:622.232

О.К. Маренич, И.В. Ковалёва /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ А37ХХ КАК ФАКТОР ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЕГО ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОГО СОСТОЯНИЯ

На основании исследования технического состояния элементов конструкции автоматического выключателя А 3792, прошедшего цикл многократных коммутаций силовой электрической цепи, установлены факторы, определяющие возможность возникновения междуфазной проводимости в зоне перемещения силовых контактов.

Ключевые слова: *автоматический выключатель, дугогасительная камера, электрический ток, короткое замыкание, электрическая дуга, ионизация, междуфазная проводимость.*

Постановка проблемы

Автоматический выключатель А37ХХ на протяжении длительного времени является основным, единственным силовым коммутационным аппаратом, выполняющим функцию оперативной подачи/снятия напряжения питания трехфазной электросети участка шахты и автоматического отключения этой сети в случае возникновения аварийных (опасных) состояний, в частности коротких замыканий.

Благодаря своей высокой коммутационной способности (от 17 до 24 кА) соответствия рабочей проводимости и номинального напряжения параметрам шахтных участковых электросетей, наличию всех видов расцепителей, реагирующих на аварийные состояния сети, эта серия коммутационных аппаратов стала базой создания рудничных автоматических выключателей серии АВ и распределительных устройств низкого напряжения РУНН всего типажного ряда комплектных участковых трансформаторных подстанций (КТП типов ТСВП, КТПВ ВСТП и т.п.).

Это позволило не только обеспечить разработку и применение комплектных трансформаторных подстанций мощностью 400 кВА и более, но и существенно повысить эффективность и безопасность эксплуатации рудничных участковых электросетей номинального линейного напряжения 660 В, вытеснить из эксплуатации автоматические фидерные выключатели (АФВ), отличающиеся целым комплексом недостатков [1].

Многолетний успешный опыт эксплуатации аппаратов А37ХХ в шахтных сетях напряжения 660В послужил основой для разработки модификации А3792У2, адаптированной к промышленной электросети номинального линейного напряжения 1140 В.

Эксплуатация данного выключателя в шахтной участковой электросети указанного напряжения (в составе РУНН КТП и аппаратов АВ) подтвердила рациональность его параметров и схемы.

Однако при эксплуатации автоматического выключателя был выявлен неблагоприятный эффект, суть которого состоит в возникновении междуфазной (трехфазной) проводимости в зоне расположения силовых контактов в момент перемещения подвижной силовой контактной группы в процессе включения аппарата (А3792) после автоматического его срабатывания на отключение междуфазного короткого замыкания (к.з.) сети.

Зафиксированные аварийные (опасные) состояния выключателя А3792У2 в сети линейного напряжения 1140 В, в основном, приходятся на случаи, когда речь шла об автоматическом отключении междуфазных к.з., возникших в отходящем присоединении в непосредственной близости от выхода КТП при мощности подстанции 630 кВА и выше (т.е. в зоне максимальных токов к.з.).

Имеющаяся информация, полученная от эксплуатационных служб различных предприятий, позволяет сделать вывод о том, что описанный прецедент является повторяющимся, что определяет актуальность разработки технических решений по предупреждению возникновения междуфазных проводимостей в элементах аппарата А3792, либо замены данного аппарата на высоковольтный автоматический выключатель, что потребует значительных материальных затрат, существенно увеличит габариты и усложнит конструкцию РУНН КТП, группового автоматического выключателя технологического участка шахты.

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

Анализ последних исследований и публикаций

Процесс образования электрической дуги при коммутации силовой электрической цепи описан в [2…5]. В частности, рассмотрена физика ионизационных процессов и методы эффективного дугогашения, адаптированные к применению в конструкции автоматических выключателей. Это дает основания делать предположение об электроионизационных процессах как о причине формирования путей утечки в автоматическом выключателе вследствие медного напыления на поверхность электроизоляционных деталей. Детально физика сильноточных электрических дуг освещена в работе [2], где особое внимание уделено анализу экспериментальных исследований процессов в системе «эмитирующий катод – прикатодная плазма», что подтверждает обоснованность ранее выдвинутого предположения.

Вопросам повышения эффективности контактно-дугогасительных систем сильноточных коммутационных аппаратов посвящено исследование [6]. В нем установлены зависимости дифференциального сопротивления дуги от тока гашения, что позволяет делать вывод о приемлемости применения технических средств токоограничения, функционирующих в момент возникновения и в процессе отключения цепи к.з. в силовом присоединении автоматического выключателя. Общие сведения о конструкции автоматического выключателя А37ХХ (включая типоразмер А3792) содержатся в [1,7], что способствует формированию объективных выводов о возможности формирования путей междуфазных утечек в элементах его конструкции вследствие электроионизационных воздействий. В комплексе упомянутые публикации и научные результаты позволяют сформулировать цель и задачи актуальных исследований.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является выявление элементов в конструкции автоматического выключателя А3792, позволяющих при наличии экстремальных электроионизационных процессов, сопровождающих коммутацию силовых присоединений в состоянии токовой перегрузки, создавать междуфазную электрическую проводимость.

Для достижения этой цели рационально исследование технического состояния элементов силовой контактной группы, дугогасительных камер и корпусных деталей автоматического выключателя А3792, прошедшего многократные циклы коммутации номинальных токов нагрузки (630А) и токов перегрузки.

Основной материал исследования

Учитывая специфику возникновения междуфазных коротких замыканий внутри конструкции автоматического выключателя А3792, происходящих после защитного отключения к.з. в отходящем присоединении в момент повторного перемещения подвижных контактов, представляется целесообразным рассмотреть конструкционные элементы этого выключателя, находящиеся в зоне расположения силовых контактов, на предмет выявления их способности создавать дополнительные пути утечки (рис. 1). Применительно к силовым контактным группам практический интерес представляет исследование технического состояния подвижных и неподвижных контактов дугогасительных камер, геометрии указанных элементов.

Рассматривая конструктив размещения подвижного силового контакта 1 в полости дугогасительной камеры 2, следует отметить весьма малую величину зазора между контактом и пластинами дугогасительной решетки камеры. Так, при ширине подвижного контакта 26,7 мм ширина прилегающей полости дугогасительной камеры составила 28,1 мм, что определило величину зазора с каждой стороны в 0,7…0,8 мм.

Техническое состояние силовых контактов, многократно выполнявших отключение промышленной электросети с номинальной активно-индуктивной нагрузкой и в состоянии перегрузки, позволяет сделать вывод о высокой степени вероятности термического деформирования поверхности силовых контактов как реакции на воздействие электрической дуги, образующейся при коммутационном процессе. Так, в контактной группе со следами интенсивного электродугового воздействия зафиксированы наплавления высотой до 1,4 мм относительно плоскости контакта (рис. 2а), что в сравнении с исправной контактной группой (рис. 2б) существенно уменьшает площадь контакта и провоцирует еще большую тепловую перегрузку. Появление таких аномальных поверхностей силовых контактов обусловлено процессом формирования струи жидкого металла (адиабатический процесс) в межконтактном промежутке. В частности, минимальное термически стойкое сечение струи для определенного времени нагрева определяется выражением [6]:

$$S_T = \frac{I}{a} \cdot \sqrt{t_н}\,, \qquad (1)$$

где I – ток в струе; $t_н$ – время нагрева струи; a – параметр, зависящий от физических свойств жидкого металла, определяется по следующему выражению:

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



Рис. 1. Общий вид силовой трехполюсной контактной группы автоматического выключателя А3792:
1 – подвижный контакт; *2* – дугогасительная камера; *3* – рукоятка выключателя

$$a = \left(\frac{\gamma_{пл} \cdot c_{пл}}{\rho_{пл} \cdot a} \left(\ln \frac{1+\alpha \cdot (T_1 - T_{пл})}{1+\alpha \cdot (T_o - T_{пл})} + \right. \right.$$
$$+ (\beta + \xi) \left[T_1 - T_o - \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1+\alpha \cdot (T_1 - T_{пл})}{1+\alpha \cdot (T_o - T_{пл})} \right] +$$
$$+ \beta \cdot \xi \left[\frac{T_1 - T_2}{2} - (\frac{1}{\alpha} + T_{пл}) \cdot (T_1 - T_o) + \right.$$
$$\left. \left. \left. + \frac{1}{\alpha^2} \ln \frac{1+\alpha \cdot (T_1 - T_{пл})}{1+\alpha \cdot (T_o - T_{пл})} \right] \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

В выражении (2) $\gamma_{пл}$, $c_{пл}$, $\rho_{пл}$ – плотность, удельная теплоемкость, удельное сопротивление жидкого металла при температуре плавления $T_{пл}$; α, β, ξ – температурные коэффициенты удельного сопротивления, удельной теплоемкости и плотности жидкого металла; T_o – начальная температура жидкого металла; T_1 – конечная температура, принимается различной в зависимости от конструкции и режима работы коммутационного аппарата (может быть равна либо температуре кипения жидкого металла, либо меньшей температуре).

При этом максимальная плотность тока термической стойкости в струе жидкого металла равна [6]:

$$\delta_T = a \cdot \sqrt{\frac{v}{l}}, \quad (3)$$

где l – длина жидкометаллической струи, м, v – скорость жидкого металла в струе, м/с.

Таким образом, износ поверхностей силовых контактов автоматического выключателя А3792, вызванный воздействием электрической дуги в



а б

Рис. 2. Состояния поверхности силовых контактов автоматического выключателя А3792:
а – подвергшихся электродуговому воздействию в процессе отключения высоких токов;
б – нормальное состояние контактов

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

ходе его эксплуатации, является вероятным и должен учитываться при моделировании процессов воздействия дуги на поверхности прилегающих элементов его конструкции.

Показательно, что наиболее интенсивным оплавлениям подвергаются нижние части подвижного и неподвижного силовых контактов. Частично это объясняется особенностями конструкции дугогасительной камеры, где зона коммутации нижних частей силовых контактов с обеих сторон охвачена керамическими накладками специальной формы с максимальными габаритами 51,5×26,9 мм (рис. 3а). Показательно, что на керамических накладках имеется нагар, а металлическая дугогасительная решетка имеет многочисленные выгорания и оплавления (рис. 3б), что свидетельствует о вероятности воздействия электродуговых коммутационных процессов на элементы конструкции дугогасительных камер.

С учетом отсутствия дугогасительного эффекта в местах перемещения нижних частей силовых контактов и крайне малых величин зазоров между ними и керамическими накладками, резонно предположить, что при отключении чрезмерно высоких токов трехфазного к.з. в сети напряжения 1140 В, именно на поверхностях керамических накладок и близлежащих поверхностях вследствие энергетики (термоэлектронная и автоэлектронная эмиссия) электрических дуг произойдет напыление металлом силовых контактов выключателя (медью).

Рассмотрим конструкцию корпусных деталей автоматического выключателя А3792, прилегающих к нижним частям дугогасительных камер (рис. 4). В базовой части корпуса, выполненного из термостойкого и трекингостойкого полистирола, практический интерес представляют форма и размеры изоляционного ребра между полостями размещения дугогасительных камер. В средней части ребра (шириной 9,3 мм), в углублении (глубина 9 мм) предусмотрена стеклотекстолитовая прокладка, выступающая из полости ребра на 3,6 мм (на рис. 4 не показана), которая входит в соответствующую полость крышки отсека дугогасительных камер. Такое исполнение исключает междуфазный электрический пробой через электроизоляционное ребро в пределах размещения стеклотекстолитовой прокладки.

Однако обращает на себя внимание наличие медного налета на полости нижней части изоляционного ребра 1, на поверхности текстолитовой изоляционной вставки 2 (ограждающей механизм свободного расцепления) и на фрагментах деталей, охватывающих указанную текстолитовую вставку. Именно нижняя часть изоляционного ребра непосредственно сопряжена с полостью максимально интенсивного дугообразования (нижние части коммутируемых силовых контактов).

Здесь имеется площадка шириной 3,6 мм, не отгороженная между фазами изоляционными ребрами. Геометрически размеры изоляционного промежутка между фазами при отсутствии токопроводящей поверхности и с учетом наличия прилегающей крышки дугогасительных камер позволяют исключить междуфазный электрический пробой. В этом случае пробивное напряжение рассчитывается на основе классических методов:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \qquad (4)$$

где $E_{пр}$ – электрическая прочность диэлектрика, кВ/м; $U_{пр}$ – пробивное напряжение, кВ; h – толщина диэлектрика в месте пробоя, м.



а б

Рис. 3. Дугогасительная камера автоматического выключателя А3792 со следами электродугового воздействия при коммутации высоких токов: *а* – керамическая накладка в нижней части камеры со следами теплового воздействия электрической дуги; *б* – медные наплавления на дугогасительной решетке камеры

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

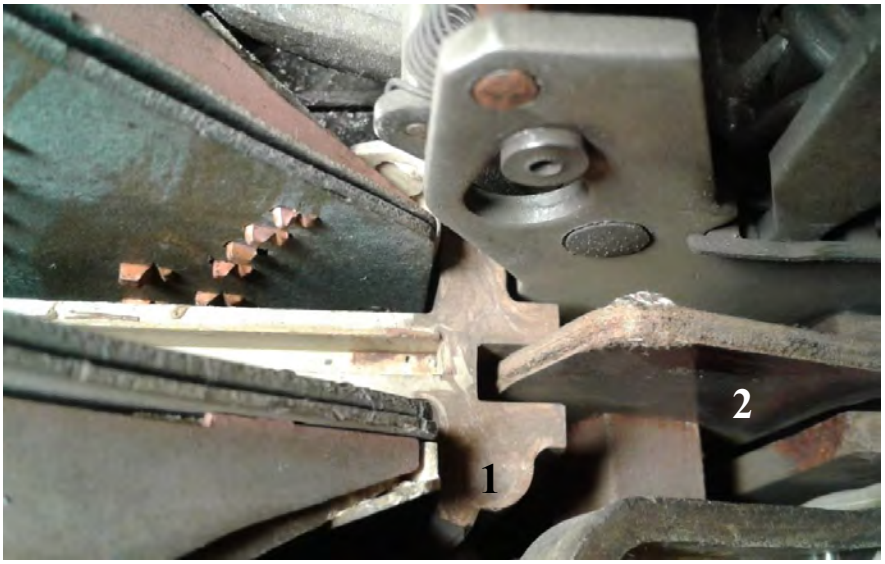


Рис. 4. Фрагмент основания корпуса автоматического выключателя А3792:
1 – электроизоляционное ребро, отделяющее силовые контактные группы полюсов разных фаз и их дугогасительные камеры; *2* – текстолитовая изоляционная вставка, ограждающая механизм свободного расцепления

Однако в случае контактного отключения сверхвысоких токов при напряжении свыше 1000 В вероятен ионизационный пробой, тем более, если медное напыление охватывает всю междуфазную поверхность диэлектрического корпуса в местах, приближенных к силовым контактам автоматического выключателя. Этот вид пробоя сопровождается действием на диэлектрик химически агрессивных веществ, образующихся в газовых порах диэлектрика при частичных разрядах в газе, а также эрозией диэлектрика на границе пор ионами газа. Здесь пробой воздуха обусловлен явлениями ударной и фотонной ионизации и подчинен действию закона Пашена, в соответствии с которым пробивное напряжение воздуха пропорционально произведению давления воздуха P на расстояние между электродами h (рис. 5) [3].

Таким образом, в результате проявления электроионизационных процессов медное напыление появляется на поверхностях пластин дугогасительных камер (см. рис. 1, наиболее интенсивно – средняя фаза), на электроизоляционных поверхностях корпусных деталей. Это существенно сокращает путь утечки и создает электрическую проводимость между фазами через щель, образуемую прилеганием крышки дугогасительных камер к базовой части корпуса, что и подтверждается наличием медного налета на поверхности изоляционного ребра, разделяющего области коммутируемых контактов разных фаз.

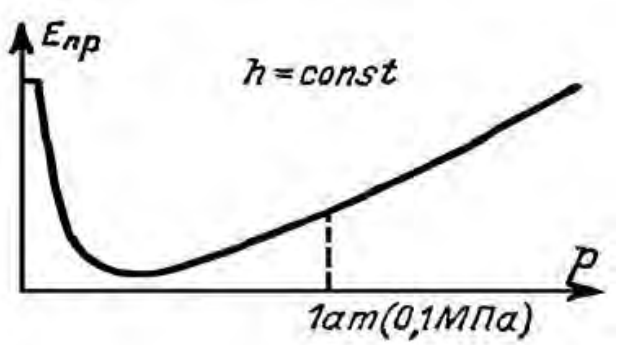


Рис. 5. Форма зависимости электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в однородном поле

Выводы

Исследованием установлено свойство конструкции дугогасительных камер автоматического выключателя А37ХХ препятствовать снижению тепловых нагрузок, формируемых в нижних частях коммутируемых силовых контактов в случае дугообразования при коммутации значительной нагрузки.

Возникающие электроизоляционные процессы значительной мощности (при разрыве цепи междуфазного к.з. в сети напряжения 1140 В) способны вызывать омеднение поверхностей сопряженных деталей, что выявлено на примере исследования конкретного образца. При этом установлены свойства конструкции корпуса автоматического выключателя А37ХХ создавать междуфазные пути утечки по поверхностям изоляционных компонентов в случае их омеднения.

Направлением дальнейших исследований является установление фактических параметров электроионизационных процессов, обусловленных дугообразованиями при коммутации токов к.з. и свойств токоограничительных устройств, действующих в процессе их отключения.

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

Список литературы
1. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. / В.С. Дзюбан [и др.]; под ред. Б.Н. Ванеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: Юго-Восток Лтд, 2001. – Т.2. – 440 с.
2. Горячев, С.В. Экспериментальное исследование прикатодной области сильноточных электрических дуг: дис. … канд. техн. наук: 01.04.08 / Горячев Сергей Викторович. – Москва, 2010. – 178 с.
3. Жуков, М.Ф. Динамика паров металла в пристеночных слоях плазмы / М.Ф. Жуков [и др.]. – ДАН СССР. – 1981. – №6. – Т. 260. – С. 1354.
4. Стенин, В.В. Особенности эрозии термоэмиссионного катода / ТВТ. – Москва: Наука, 1985. – Т.23. – С. 858-862.
5. Кирсанов, А.В. Оптимизация эксплуатации электрических аппаратов в энергетических системах, оборудованных средствами телемеханики: дис. … канд. техн. наук: 05.09.01 / Кирсанов Алексей Валерьевич. – М., 2005. – 133 с.
6. Воронин, А.А. Повышение эффективности контактно-дугогасительных систем сильноточных коммутационных аппаратов с удлиняющейся дугой: дис. … канд. техн. наук: 05.09.01 / Воронин Александр Анатольевич. – Самара, 2009. – 178 с.
7. Выключатели автоматические А3790: техническое описание и инструкция по эксплуатации [Электронный ресурс] // АО «Контактор»: завод электротехнической промышленности. – Москва, 2017. – Режим доступа: https://www.kontaktor.ru/upload/iblock/ad1/A3790_TO.pdf

O.K. Marenich, I.V. Kovaljova /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

DESIGN ELEMENTS OF AUTO SWITCH A37XX AS A FACTOR OF OCCURRENCE OF ITS POTENTIALLY DANGEROUS STATE

Background. *Automatic power switch A3792 is a reliable device in the mine section electrotechnical complex with voltage 660 V. It can be used in a network with voltage 1140 V expediently also. However, there are cases when, after turning off ultrahigh short-circuit currents, conduction between phases occurs inside the circuit breaker. This leads to damage. It is important to find out the reason for such a phenomenon.*
Materials and/or methods. *The reasons for the appearance of conduction between phases in the design of the A3792 circuit breaker can be identified as a result of studying the design of this device after performing multiple cycles of disconnecting the electric current overload, including short circuits. The obtained results should be compared with the theoretical prerequisites for the occurrence of conductivity between phases over dielectric surfaces.*
Results. *When turning off ultrahigh currents, the temperature effect of an electric arc can damage the surface of the power contacts of the circuit breaker. Ionization processes that occur when an electric arc is burning between the power contacts of a switch are the cause of copper deposition on the dielectric surfaces of a circuit breaker. The most extreme thermal and ionization conditions created by the design of the lower part of the arcing chamber and the dielectric enclosure between the switching devices of different phases.*
Conclusion. *The studies confirmed the ability of the A3792 circuit breaker to create conductivity between phases after the process of turning off ultrahigh currents, such as short-circuit currents in an electrical network with a voltage of 1140 V. Using a circuit breaker with a special design is very expensive and impractical for normal operating conditions. Operation of the A3792 circuit breaker in an electrical network with a voltage of 1140 V is possible if additional devices are used to limit the currents of extreme modes.*

Keywords*: automatic switch, interrupter chamber, electric current, short circuit, electric arc, ionization, interfacial conductivity.*

Сведения об авторах
О.К. Маренич
Телефон: +380 (71) 317-32-09
Эл. почта: marenich13@gmail.com

И.В. Ковалёва
SPIN-код: 5187-2555
Телефон: +380 (71) 334-91-00
Эл. почта: visara85@mail.ru

Статья поступила 05.10.2018 г.
© О.К. Маренич, И.В. Ковалёва, 2018
Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский

УДК 621.713.13: 621.313

С.Н. Ткаченко /к.т.н./, П.Р. Никифоров, А.В. Коваленко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВА НЕВОЗРАСТАНИЯ ОБЪЕМА ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ SCADA НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТЕНДОВ

Для моделирования процессов в системах SCADA, построенных на основе совместного моделирования в САПР и физического имитационного моделирования, предлагается к существующим физическим лабораторным стендам разных учебных дисциплин добавить информационные датчики на основе микропроцессорной базы и программируемых логических матриц. Моделирование выполнено по трем сигналам – релейная защита и автоматика, «живучесть», «эффективность». Предложен способ методического совершенствования структуры и алгоритмов системы SCADA.

Ключевые слова: *система SCADA, концепция Smart Grid, цифровая подстанция, релейная защита и автоматика, структурно-информационный метод.*

Постановка проблемы

Решение задач построения систем SCADA возможно на основе совместного моделирования в САПР и физического имитационного моделирования. В распределительных электросетях напряжением 6…35 кВ такие задачи появляются при реализации концепций Smart Grid, «цифровая подстанция», «цифровая ячейка», «аутсорсинг услуг». Для совершенствования, разработки, реализации алгоритмов систем SCADA и интуитивно понятных способов отображения технологического процесса (ТП) в автоматизированной системе управления (АСУ) ТП Щита контроля изоляции согласно концепциям Smart Grid, «цифровая ячейка», «цифровая подстанция», «аутсорсинг услуг» требуется построение структурно емких моделей. Например, совместное моделирование устройств управления, а также релейной защиты и автоматики (РЗиА/*RPA*), объекта управления и защиты (ОУЗ/*OCP*), исполнительных органов *EU*, формирователей и датчиков информационных сигналов и др. Это требует значительных затрат материальных и временных ресурсов. В то же время в университете при изучении дисциплин «Основы релейной защиты и автоматизации энергосистем», «Автоматизация производственных процессов», «Микропроцессорные защиты и автоматика электрических систем», «Автоматизированные системы проектирования и управления», «Электрическая часть станций и подстанций» и др. имеются стенды лабораторных работ. Можно выделить элементы и оборудование ОУЗ, технологические цепочки построения станций и подстанций, позволяющие задавать тестовые, контрольные, аварийные, специальные режимы работы ОУЗ, формирователи сигналов для устройств РЗиА. Таким образом, при организации SCADA-системы на имеющихся стендах одной или нескольких лабораторий можно выполнять моделирование процессов в SCADA, в том числе дистанционное оперативное управление и контроль работы.

Анализ последних исследований и публикаций

Согласно источникам [1,2] работа технологического и других процессов в сети представляется согласно цепочке SCADA – ОСР. В статье рассматривается реализация SCADA-системы на основе передачи смыслового сигнала $S(t)$. В качестве примера рассматривается разработка системы SCADA в задаче контроля переходных процессов в контуре нулевой последовательности сети также, как в [3]. Авторами предлагается способ численного анализа и систематизации известных алгоритмов SCADA-систем, который следует из структурно-информационного метода, описанного в [1,4…6]. Методическое совершенствование алгоритмов основано на шаблонах схем системы SCADA и устройств РЗиА, описанных в [7…12]. Обеспечение невозрастания объема информации достигается передачей только смысловых сигналов по локальным информационным сетям с последующим их объединением на более высоком иерархическом уровне защиты и управления [13]. В данной работе формирователи сигналов введены в алго-

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

ритмы релейной защиты и автоматики. Моделирование выполнено по трем сигналам – реле, «живучесть», «эффективность». Такой подход позволяет также решать задачи учебного процесса и совершенствования алгоритмов релейной защиты и автоматики, проектирования электростанций и подстанций, диспетчеризации, технологического управления.

Цель (задачи) исследования

Решения задач реализуются методикой обучения и практической направленностью.

Среди задач методической направленности обучения можно выделить – построение SCADA-систем для конкретных энергообъектов, каналов и протоколов передачи информации, синхронизации сигналов управления, анализа переходных процессов в аварийных файлах, способах защиты информации при передаче по проводным, беспроводным и оптоволоконным, спутниковым каналам с алгоритмами кибербезопасности и оперативной работы, а также согласования реальных процессов в SCADA с ее последующей реализацией в САПР.

Среди задач практической направленности можно выделить следующие: построение специальных проектируемых участков или всего энергетического объекта, реальных энергообъектов, самоконтроля работы, реализации разрабатываемых устройств РЗиА и подстанций согласно протоколам МЭК, концепциям формирования отображения ТП, сигналов аварийных файлов, задачи рабочих мест главного щита управления (ГЩУ), аутсорсинга служб РЗиА, изоляции, хозяйствующего менеджмента, программой реализации и специфики оперативной работы обслуживающего, ремонтного персонала.

Основной материал исследования

Описание системы. Конечный смысловой результат управления технологическим процессом – интуитивно понятное смысловое представление текущего, предыдущего состояний ОУЗ, а также формирование рекомендаций по последующему состоянию ОУЗ. Контроль смысла минимизирует оперативные затраты. Эти задачи решает SCADA-система АСУ ТП с аутсорсинговым рабочим местом. Все имеющиеся устройства РЗиА, высоковольтное оборудование, исполнительные органы, выключатели Q и т.д. должны поставлять информацию для системы. Следовательно, энергопредприятие, сеть, оборудование должны быть спроектированы с учетом такого управления. Работа технологического и других процессов в сети представляется согласно цепочке SCADA – OCP (рис. 1). В статье рассматривается реализация SCADA-системы на основе передачи смыслового сигнала $S(t)$ с использованием диапазона порогов ρN согласно (рис. 2) и работам [1,2]. От устройств РЗиА запрашиваются сигналы аварийных файлов только в случаях сложных нехарактерных ситуаций, катастрофического развития аварий, отказа и др.

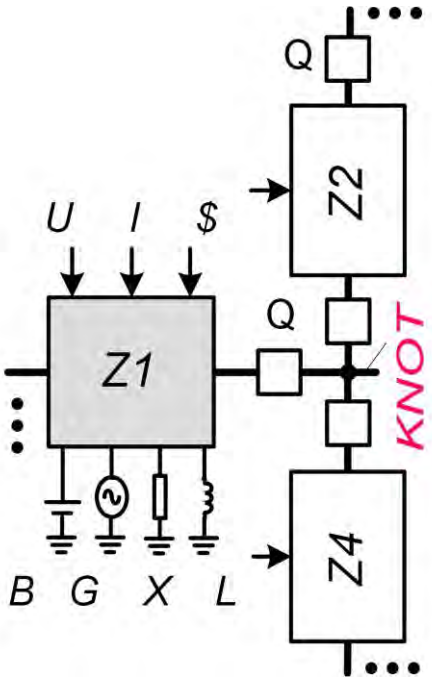


Рис. 1. Унифицированная схема сети Smart Grid SCADA – Driver – EU – OCP

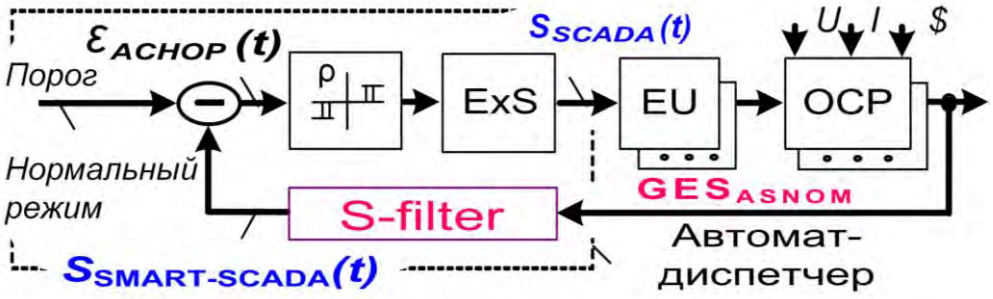


Рис. 2. Система ASNOM SCADA по сигналу $S_{SCADA}(t)$:
OCP – объект; *ExS* – экспертная система; *EU* – исполнительные органы;
Driver – алгоритмы РЗиА; *S-filter* – смысловой фильтр GES_{SCADA}

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

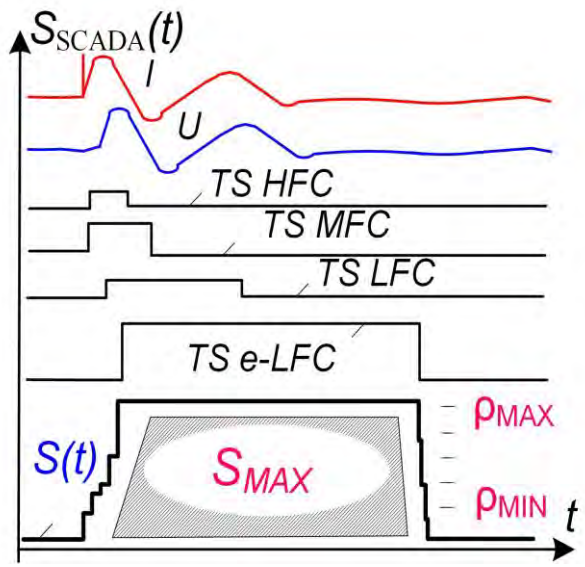


Рис. 3. Принцип формирования $S_{SCADA}(t)$ и его контроля порогами ρN:
TS – терминальные символы;
HFC – высокочастотные компоненты;
MFC – среднечастотные компоненты;
LFC – низкочастотные компоненты;
e-LFC – медленные огибающие низкочастотные компоненты; *TP* – переходный процесс

В качестве примера рассматривается разработка автоматической системы стабилизации нормального режима работы ASNOM SCADA или ASNOM SCADA в задаче контроля переходных процессов в контуре нулевой последовательности сети (КНПС). КНПС является фильтром нулевой последовательности распределительной сети напряжением 6…35 кВ и выделяет информационные составляющие всей гальванически связанной сети. Графическое представление информации может быть реализовано на основе виджета В-КНПС/*W-LZSC* – оконного представления работы терминала Т-КНПС-АРК/*T-LZSC-ARC,* и системы ASNOM на дисплее РС АСУ ТП ГЩУ [3]. Также реализованы известные алгоритмы РЗиА.

Сравнительный анализ систем SCADA. Предлагается способ численного анализа и систематизации известных алгоритмов SCADA-систем, на основе которых можно построить систему ASNOM SCADA (рис. 2,3). Способ следует из структурно-информационного SI-метода [1,4,5]. Составляется обобщенная эквивалентная схема GES_{SCADA} слиянием структур известных алгоритмов SCADA с учетом необходимых свойств (рис. 4).

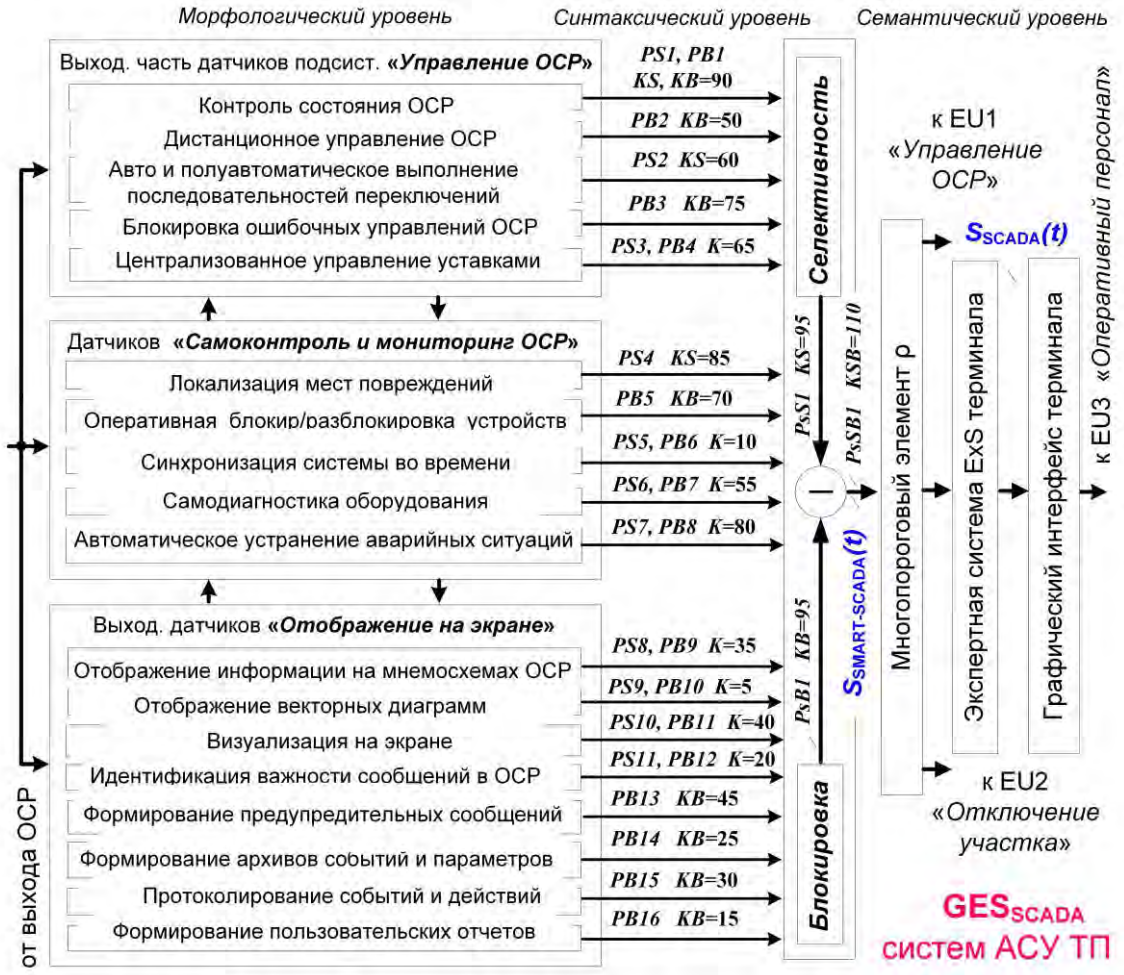


Рис. 4. Структурная схема S-фильтра АСУ ТП ГЩУ для системы ASNOM SCADA

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

Заполняется в виде таблицы, приведенной на рис. 5 систематизации Ψ-структур SCADA, где А<Ψ<Я, с вариантами грамматики G_Ψ схемы GES_{SCADA}:

$$G_\Psi=(PS1,PS2,PS3,PS4,PS5,PS6,PS7,PS8,\ PS9,PS10,PS11,PB1,PB2,\ldots,PB16,\ PsS1,PsB1,PsSB1). \quad (1)$$

Выделяется иерархическая линия развития структурных схем устройств от «простого» к «совершенному» (показана красным цветом для структур А<Ψ<Я в таблице (рис. 5). При этом структурные схемы более «совершенных» алгоритмов логически следуют из более «простых» (являются частью GES). Для ее заполнения подсчитываются весовые коэффициенты на схеме GES_{SCADA} для каждого известного алгоритма (показано на рис. 5). Например, если участвует в формировании селективное правило *PS*7 с весовым коэффициентом *KS*=80, то в формировании результирующего корневого правила *PsSB*1 участвует два корневых правила $PsSB1=f_{\&}(P_SS1,P_SB1)$, где $P_SS1=PS7$ с суммарным *KSB*=80+95 [1]. Принято, что *PsSB*1 подсчитывается отдельно для селективной *PS* и блокирующей *PB* частей схемы GES_{RPA}. В обобщенной структуре Ψ=Я участвуют все правила *P* в (1). Составлена схема GES_{SCADA} в задаче ASNOM КНПС. Выявлено 10 вариантов Ψ-структур SCADA, построенных на основе терминалов РЗиА. Показана их иерархическая систематизация (рис. 5). Подсчитано, что реализация задачи довольно эффективна (K_{EFF}=0,8). Это объясняется обобщенностью задач SCADA, структуры терминалов РЗиА.

Ниже приведены некоторые разъяснения, касающиеся обозначений на рис. 5.

А – БРЕСЛЕР-0107 ρN=7 K_Σ=550 K_{EFF}=0.43;
Ж – ЭНТЕК ρN=14 K_Σ=835 K_{EFF}=0.65;
Б – СМ РЭС ρN=10 K_Σ=670 K_{EFF}=0.53;
З – MicroScada NT ρN =15 K_Σ=895 K_{EFF}=0.71;
В – ОИК Диспетчер ρN=12 K_Σ=700 K_{EFF}=0.55;
И – SICAM PAS ρN=15 K_Σ=925 K_{EFF}=0.73;
Г – КОТМИ-*NT* ρN=12 K_Σ=720 K_{EFF}=0.57;
Д – Систел ρN=13 K_Σ=730 K_{EFF}=0.58;
Е – ES-Энергия ρN=13 K_Σ=785 K_{EFF}=0.62;
К – MicroSCADAPro ρN=16 K_Σ=1025 K_{EFF}=0.80;
Я – Объединенный ρN=18 K_Σ=1255 K_{EFF}=1.00.

Наглядное сравнение фиксированного объема сигнала *S*(*t*) (см. рис. 2, 3) с интенсивно увеличивающимся объемом обрабатываемой сигнальной информации в SCADA-системе проиллюстрировано на рис. 6.

Предлагаемые решения. Согласно SI-методу рассматривается непрерывное совершенствование устройств с разделением на иерархические этапы «Анализ→Синтез→Конструктив» [1…4]. Каждый этап выполняется в рамках системы автоматической стабилизации нормального режима работы ASNOM SCADA (см. рис. 2).

Практическая реализация системы SCADA для разных учебных дисциплин построена на трех конструктивных основах – аппаратной, программной и графической. Так, аппаратная часть реализуется:

– для медленных переходных процессов в ОУЗ (на микроконтроллерах (МК) Atmel,

Блокировка \ Селективность	235	240	305	325	335	365	380	430	545
245			А						
335					Б				
460		В		Е					
485	Г								
490		Д							
500					Ж				
530						З			
545							И		
595								К	
710									Я

Рис. 5. Иерархическая систематизация SCADA-устройств АСУ ТП ГЩУ



Рис. 6. Сравнение фиксированного объема смыслового сигнала *S*(*t*) с увеличивающимся объемом обрабатываемой информации в SCADA

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

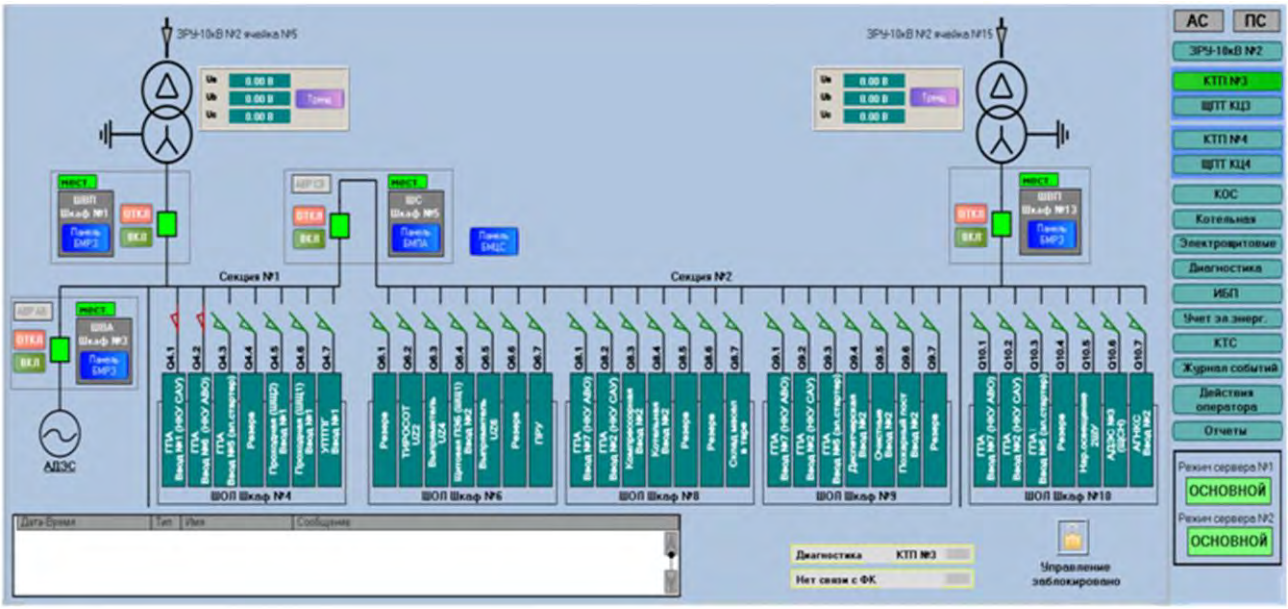


Рис. 7. Пример визуального отображения на экране терминала контроля технологического процесса

Arduino и ПЛИС CPLD MAX2);

– для средне-быстродействующих переходных процессов в ОУЗ (на МК STM, Discovery и ПЛИС CPLD);

– для локальных информационных сетей (на CAN, Ethernet, USART, RS232, RS485, Wi-Fi);

– для универсальности реализации (на промышленных контроллерах, МК Atmel, Arduino и ПЛИС CPLD).

Программная часть:

– для моделирования работы этих комплектов (на имеющемся ПО Quartus, Proteus, MatLAB, OrCAD);

– для разработки программ для МК (ПО CodeVision, KEIL, библиотеки CUB, операционные и файловые системы, Arduino);

– для моделирования переходных процессов в ОУЗ (на САПР PowerFactory DigSi, Elpek, MatLAB, OrCAD и др.).

Графическая часть – на экране системы SCADA отображается общая схема технологического процесса объектов или электросети на однолинейной схеме сети (рис. 7).

На рынке специализированного ПО имеются коммерческие продукты SCADA с предлагаемыми собственными информационными датчиками. Однако для учебного процесса приемлемыми являются собственные разработки студентов (конструктивные решения, ПО и сопутствующая элементная база).

Предлагаемые фирмами-разработчиками старт-платы МК возможно использовать по назначению, в качестве информационных датчиков, или использовать схемотехнические решения для собственных сквозных разработок в САПР, моделирования конструктивных решений и ПО. Например, MatLAB позволяет построить SCADA-систему из имеющихся графических блоков, с подключением датчиков к РС, старт-платам Arduino и Discovery, работать с датчиками на основе их ПО с объектно-ориентированным языком.

Изготовлены устройства на основе МК фирм Atmega, STM для совершенствования алгоритмов РЗиА с выдачей информации на терминалы «цифровой ячейки», «цифровой подстанции», SCADA-системы.

Выводы

Предложена схема GES_{SCADA}, основанная на формировании смыслового сигнала $S(t)$. Формирование выполняется автоматами в устройствах РЗиА на разных иерархических уровнях обработки информационных потоков. Передается только $S(t)$, в случае необходимости вызывается соответствующий аварийный файл из конкретных устройств и терминалов РЗиА.

В структуре SCADA не происходит усложнение и увеличение количества обрабатываемой информации. Это позволяет строить автоматические алгоритмы распознавания смыслового состояния объекта управления по сигналам аварийных файлов.

Предложен способ методического совершенствования структуры и алгоритмов системы SCADA согласно SI-методу. Совершенствование основано на шаблонах схем GES_{RPA}, GES_{OCP}, GES_{ASNOM}, GES_{SCADA} согласно их грамматикам $G_{OCP} \approx \Sigma G_{GES} = \Sigma G_{RPA} = G_{SCADA}$, таблицах систематизации Ψ-структур устройств SCADA. К схемам

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

GES можно свести известные алгоритмы систем SCADA с разноплановыми авторскими описаниями. В качестве шаблонов схемы GES позволяют получить или не оставить без внимания необходимую информацию, рассчитать варианты изменений, передать результаты для будущих совершенствований. Способ позволяет реализовать современные концепции построения электроэнергетических объектов разного класса напряжения.

Приведен сравнительный анализ 10 вариантов Ψ-структур SCADA-систем. Анализ позволяет формировать рекомендации по совершенствованию качественных характеристик алгоритмов и структур SCADA.

Информационные датчики строятся методически согласно унифицированным детекторам. Задействуются предложенные фирмами-изготовителями старт-плат специальное объектно-ориентированное программное обеспечение и обучающие графические и видеоматериалы.

Предлагается применение сигнала $S(t)$ для реализации критериев надежности, устойчивости, чувствительности, быстродействия, относительного сравнения, дополнительных критериев. Появляется возможность определить поврежденный участок сети при низкой достоверности входной информации, смене сложных ситуаций, разрывах ее следования, сторонних помехах и др.

Полученные результаты моделирования работы алгоритмов в реальном масштабе времени используются для построения разрабатываемого устройства У-ВЦР-СП со встроенным высокочастотным цифровым регистратором и алгоритмами селективного поиска поврежденного присоединения сети при однофазных замыканиях на землю.

Список литературы

1. Nikiforov, A. Unified smart-detector for electrical power smart grid networks. / 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 22-24 July 2015. – Cambridge, 2015. – P. 1032-1039.
2. Никифоров, А.П. Поддержание эффекта самовосстановления изоляции для повышения «живучести» сетей смарт-грид напряжением 6-35 кВ / А.П. Никифоров, П.Р. Никифоров // Материалы 21-й междун. конфер. по автоматическому управлению «Автоматика–2014», 23-24.09.2014 г. – К.: Изд-во НТУУ «КПИ» ИПИ ППК «Политехника». – С. 208-209.
3. Никифоров, А.П. Виджет «Контур нулевой последовательности сети» для мобильного дисплея АСУ ТП «Электро смарт-грид» / 15 междун. науч.-технич. конфер. ICPEES-2014 «Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах». 14-16 мая 2014 г. – С. 152-155.
4. Ткаченко, С.Н. Совершенствование цифровых устройств релейной защиты и автоматики в интеллектуальных энергосистемах концепции Smart Grid / С.Н. Ткаченко, А.В. Коваленко // Завалишинские чтения'16, ГУАП, г. Санкт-Петербург, 2016. – С. 239-245.
5. Никифоров, А.П. Теорема о наличии смыслового сигнала в системах релейной защиты / Материалы 10 науч.-техн. конференц. «ПСЕ-2010», 02.06.2010. – Киев: НАН Украины. Институт электродинамики, 2010. – С. 73-76.
6. Nikiforov, A.P. Application of the Theorem of “About the Unity of the Structural Description of RPA Devices” for the Simulation of a Power Network Smart-Grid // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, Jakarta, Indonesia. – 2017. – No.1-5. – Vol.9. – P. 39-48.
7. Thamilvalluvan, B. A novel relay used for fault detection and isolation in distribution networks containing of several DGs / B. Thamilvalluvan, P. Aswini, M. AntoBennet, et al. // Int. Conf. ICEEOT, 3-5 March 2016. – Tamil Nadu, India, 2016. – P. 3574-3580.
8. Zellagui, M. Impact of renewable dispersed generation on performance of directional overcurrent relay on MV distribution power system / M. Zellagui, M. Karimi, H. Mokhlis, et al. // 8th Int. Conf. on Electrical Engineering (CEE), November 16-17, 2014, Nagpur, India, 2014. – P. 5.
9. Javadian, S. An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks including DG using distribution automation system and its implementation on a real distribution network / S. Javadian, M. Massaeli // Indian Journal of Science and Technology. – 2011. – No.11. – Vol.4. – P. 1438-1445.
10. Ates, Y. Additive protection scheme for a distribution system considering grid-connected and islanded modes of operation / Y. Ates, A. Boynuegri, M. Uzunoglu [et al.] // Energies. – 2016. – No.378. – Vol.9. – P. 5.
11. Jones, D. Future distribution feeder protection using directional overcurrent elements / D. Jones, J. Kumm // Rural Electric Power Conference (REPC) – IEEE, 2013. – P. 6.
12. Huchel, L. Planning the Coordination of

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

Directional Overcurrent Relays for Distribution Systems Considering DG / L. Huchel, H. Zeineldin // IEEE Trans. Smart Grid, Power and Energy Society General Meeting. – Iss.3. – Vol.7. – 2016. – P. 1642-1649.

13. Santos, T. Fault identification using multiple information sources in smart distribution grids / T. Santos, R. Pavão, F. Homma, R. Chumbinho // 22nd Int. Conference on Electricity Distribution (CIRED), 10-13 June 2013. – No.1443. – P. 4.

S.N. Tkachenko /Cand. Sci. (Eng.)/, P.R. Nikiforov, A.V. Kovalenko
Donetsk National Technical University (Donetsk)

FUNCTIONAL MODELING OF THE FEATURE OF NOT INCREASING INFORMATION VOLUME IN THE SCADA SYSTEM ON THE BASIS OF LABORATORY ELECTRICAL STANDS

Background. *The paper deals with SCADA systems built on the basis of joint modeling in CAD and physical simulation. This topic is relevant for the implementation of the concepts of "Smart grid", "Digital substation", "Digital cell", "Out-sourcing services" in distribution networks with the voltage of 6…35 kV.*
Materials and/or methods. *The comparative analysis using SI-method carried out. The way of methodical improvement of the structure and algorithms of the SCADA system according to the SI-method proposed.*
Results. *The result of the work is the comparative analysis of ten variants of Ψ-structures of SCADA-systems. The analysis allows forming recommendations on improvement of qualitative characteristics of algorithms and SCADA structures. Information sensors constructed methodically according to unified detectors based on Theorems 1 and 2. Used the special object-oriented software and training graphic and video materials offered by the manufacturers of start-boards. The application of a signal S(t) for the implementation of the criteria of reliability, stability, sensitivity, speed, relative comparison, and additional criteria proposed. There is an opportunity to determine the damaged part of the network at low reliability of the input information, change of complex situations, breaks, outside noise, etc.*
Conclusion. *The obtained results of modeling the algorithms in real time used to develop the U-VCR-SP device with a built-in high-frequency digital recorder and algorithms for the selective search of a damaged network connection at single-phase earth faults.*

Keywords: *SCADA systems, Smart Grid concept, digital substation, relay protection and automatics, structure-information method.*

Сведения об авторах

С.Н. Ткаченко
SPIN-код: 5046-6030
Телефон: +380 (62) 301-03-72
Эл. почта: tsn1981@mail.ru

А.В. Коваленко
SPIN-код: 8432-3428
Телефон: +380 (62) 301-03-72
Эл. почта: anna.kovalenkoETF@gmail.com

П.Р. Никифоров
SPIN-код: 7741-3188
Телефон: +380 (62) 301-03-72
Эл. почта: npr1943@gmail.com

Статья поступила 01.09.2018 г.
© С.Н. Ткаченко, П.Р. Никифоров, А.В. Коваленко, 2018
Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский

УДК 536.41

Д.О. Федюк
ГУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина» (Донецк)
П.И. Поляков /д. физ.-мат. н./
ГУ «Институт физики горных процессов» (Донецк)

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ И ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССАХ ПОЛИМОРФНЫХ И ФАЗОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

Экспериментально исследовано влияние температуры (T=4,2…325 K) и напряженности магнитного поля (H=0…700 Oe) на изменение магнитосопротивления и резистивный эффект поликристалла $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ легированного LCMO(10…30 %). В качестве вторых образцов для исследования использовались пленки и монокристалл низкотемпературного пниктида FeSeTe. Изменение в структуре было вызвано термоупругими искажениями в кристаллической решетке и изменением концентрации примеси в поликристалле $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Это существенно влияло на электрон-фононное взаимодействие и энергию связи. На зависимости R(T) в диапазоне T=77…325 K визуально представлены фазовые переходы полупроводник-металл-сверхпроводник, при трех значениях концентраций LCMO. В образце пниктида транспортный ток протекал через контакт FeSeTe-Nb, и на спектре I(U) для пленки наблюдалось падение проводимости в нормальной области вследствие увеличения потенциального барьера. Для монокристалла наблюдается плавный переход из металла в сверхпроводник без «провалов».

Ключевые слова: *термоупругость, бароупругость, магнитное поле, магнитострикция, манганит, пниктид, монокристалл, поликристалл, энергия связи.*

Постановка проблемы

В условиях высокого давления, низких температур и магнитного поля структура кристалла претерпевает существенное изменение. Это оказывает значительное влияние на свойство исследуемого материала (теплоемкость, магнитосопротивление и т.д.). Отклик системы на внешний параметр зависит не только от величины приложенной силы или энергии, но и от внутренней структуры материала, которая характеризуется химической концентрацией компонентов.

Анализ последних исследований и публикаций

Существенный вклад в начале изучения этой проблематики внес еще в далекие 20-е годы известный советский ученый П.Л. Капица. За время своей работы в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета, директором которой был Э. Резерфорд, им было проведено немало экспериментов в области магнетизма. Исследована магнитострикция пара- и диамагнитных веществ в сильных магнитных полях и открыта аномально большая магнитострикция монокристаллов висмута. Он обнаружил очень сильную анизотропию этой магнитострикции: при наложении магнитного поля вдоль тригональной оси висмут растягивался в направлении поля, а в поле, приложенном перпендикулярно оси, – сжимался [1]. Одним из основных результатов проведенных П.Л. Капицей исследований физических свойств веществ в сильных магнитных поля, явилось открытие им линейного закона для зависимости от магнитного поля электрического сопротивления ряда металлов в очень сильных магнитных полях. Напряженность поля, достигнутая в тот момент времени, составляла 320 килоэрстед при длительности импульса порядка 10 миллисекунд.

После открытия в 80-е годы высокотемпературных сверхпроводников вопрос о влиянии магнитного поля, давления и температуры приобрел новый смысл, поскольку эти параметры не только существенно влияли на физический процесс фазового перехода материала в состояние сверхпроводимости, но и способствовали пониманию этого явления в целом.

От давлений при фиксированной температуре происходит уменьшение объема, увеличение напряжений энергии связи, повышение плотности. Скачки объема – это фазовые переходы, структурные изменения.

От магнитного поля происходит состояние магнитонескомпенсированности из-за температуры магнитоупругих напряжений в структуре, что фиксируется магнитострикцией. Через деформацию структуры изменяется спиновая нескомпенсированность. Вносимые напряжения – это дополнительный источник изменений объема плотности, формы структуры, «охлаждаю-

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

щий эффект». В работе [2] детально исследуется процесс влияния магнитных полей на образцы поликристалла и пленок $La_{1-x}Sr_xMnO_3$. Помимо поля, изменялся процентный состав компонентов исходного вещества, таким образом, оценивались полиморфные структурные изменения. Как показали результаты, варьирование концентрации исходного вещества приводит к тому, что фазовый переход из металлической в сверхпроводящую область имеет такую же форму, как при изменении магнитного поля.

Для примера, в [3] приводятся результаты, где рассматривают такой же манганит $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ с различным содержанием Sr. Высокотемпературное магнитосопротивление отвечает резкому спаду сопротивления, сопровождающему возникновение ферромагнитного момента при некоторой температуре. Наблюдается металлическое поведение зависимости до самых низких температур. Такое поведение, как объясняют авторы статьи, возникает только для концентрации Sr выше порогового значения, при этом образцы в [4] с x=0,2 показали металлическое поведение вплоть до 200 К.

Здесь необходимо уточнить, на что именно будут опираться наши предположения при проведении эксперимента. В представлении квантовой механики взаимодействие электронов внутри кристаллической решетки может быть описано волновыми функциями, если представить некоторую упрощенную систему кристаллической структуры вещества.

Однако в реальной модели полностью описать эти явления с помощью теоретических форм практически невозможно. В кристалле, как известно, основой в формировании решетки является ячейка, которая охватывает часть структуры, состоящей из атомов, удерживаемых вместе благодаря электронным связям. Ячейка, построенная на трех кратчайших некомпланарных трансляциях решетки, называется основной ячейкой. Объем такой ячейки минимален, она содержит химический состав, формируя кристаллическую решетку, и относится, поэтому, к примитивным ячейкам. Если рассматривать процессы взаимодействия в решетке, возникающие вследствие магнитострикции, магнито- и термоупругости, то процессы деформации структуры материала будут следствием энергетических обменных взаимодействий электронов внутри ячеек и между ними. Если для примера рассматривать экспериментальный образец, то, по сути, он состоит из многокомпонентных химических элементов, которые хаотично распределены по ячейкам, а электроны, как носители заряда, являются индикаторами изменения структуры, поскольку вступают во взаимодействие внутри решетки, перемещаясь от ячейки к ячейке. Происходит процесс электрон-фононного взаимодействия и изменения в энергии связи структуры. Вследствие этих явлений электрон занимает разные энергетические уровни, а поскольку любое столкновение, вызванное взаимодействием, приводит к потере энергии и выделении ее в виде тепла, то это является причиной появления электросопротивления. Именно оно дает возможность понять, какие процессы происходят в структуре материала под действием внешних параметров и как видоизменяется энергия связи.

Цель (задачи) исследования

Целями настоящей работы являются: оценка влияния внешних параметров, а именно температуры и слабого магнитного поля на структуру и проводимость материалов; определение степени влияния примеси на свойства четырехкомпонентного поликристалла в условиях низкой температуры.

Основной материал исследования

В качестве материалов для исследования использовался поликристалл $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ с примесью LCMO с концентрацией в диапазоне 10…30 %. Вторым образцом был низкотемпературный сверхпроводник на основе железа FeSeTe, изготовленный в виде монокристалла и пленки.

Анализ результатов влияния поля H.

В работе основным являлась оценка влияния термоупругости материала как основы возникновения сверхпроводящего перехода и влияния на критическую температуру в поликристаллах $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ с примесью манганита LCMO. В качестве вторых образцов для исследования использовались кристаллы и пленки пниктидов на основе селенида железа FeSeTe.

На рис. 1а явно выражена пиковая область перехода YBCO без отклика манганита на термоупругое сжатие. Процесс измерения осуществлялся в два этапа. При погружении образца в жидкий азот присходило охлаждение от 300 К до 77 К, затем образец вынимали из азотного дюара и плавно нагревали до комнатной температуры. Измерения проводились четырехзондовым методом. При 10 % критическая температура перехода составила T_1=90 К (рис. 1а), что соответствует реальному переходу в чистом оксиде бария. При этом незначительно выражена особенность в области T_2=260 К, которая характеризуется наличием в составе La, который является слабым парамагнетиком.

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

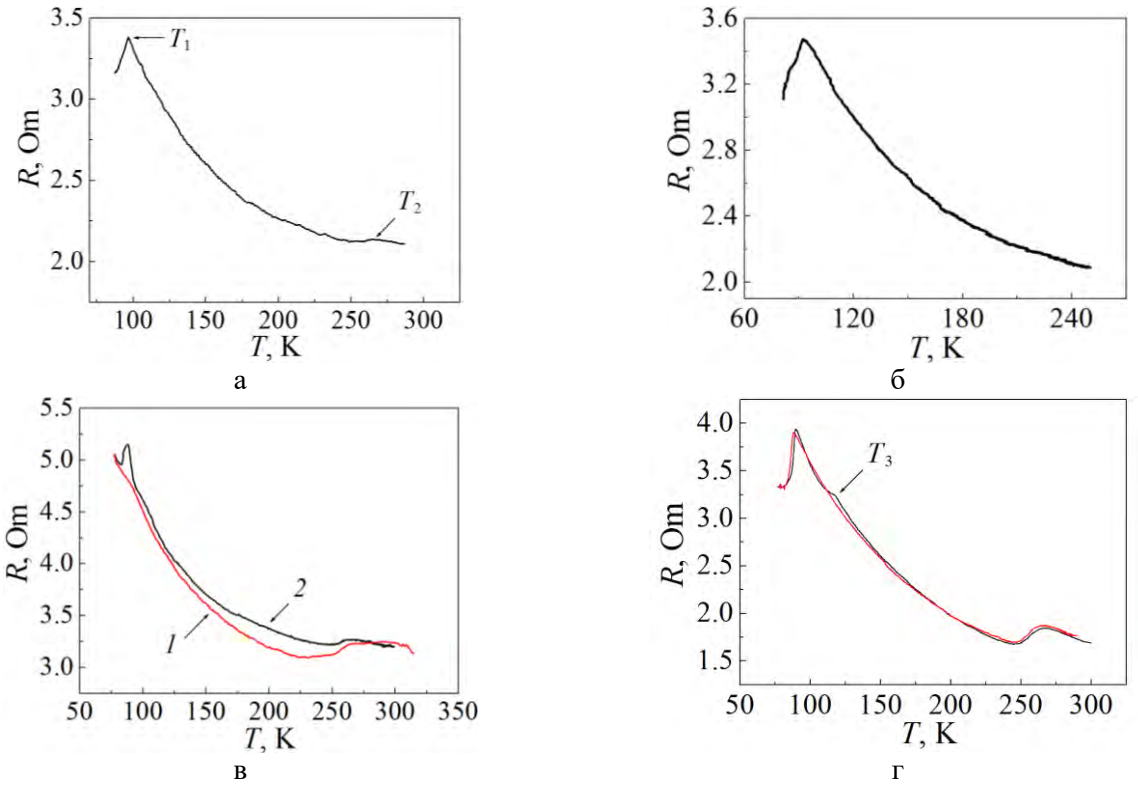


Рис. 1. Транспортные характеристики поликристалла:
а – YBCO+LCMO, 10%, *H*=0; *б* – YBCO+LCMO, 10 %, *H*=700 эрстед;
в – YBCO+ LCMO, 20 %, *1* – *H*=0, *2* – *H*=700 эрстед; *г* – YBCO+LCMO, 10 %

Из графика видно, что электросопротивление между двумя точками изменяется экспоненциально, т.е. наблюдается полупроводниковый эффект. Это можно объяснить как процесс прохождения электронов через межзеренные границы и взаимодействия с фононами кристаллической решетки в момент фазового перехода. В области T_S<90 К видим резкое уменьшение сопротивления, что явно указывает на металлический характер проводимости. Для сравнения, в работе [5,6] наблюдался аналогичный результат при изучении состава $La_{0.7-x}PrCa_{0.3}MnO_3$. Пиковое значение магниторезистивной области увеличивалось по мере роста *x*, при этом температура перехода падала от 250 до 80 К.

На рис. 1в представлен результат измерения с концентрацией манганита 20 % в условиях слабого магнитного поля (*H*=700 эрстед). Визуально наблюдается полупроводниковый эффект 87 К и 260 К, а при отключении поля – резкий спад пиковой области оксида бария и подъем в области манганита. Это объясняется намагниченностью манганита, которая в отожженном образце значительно выше, чем в неотожженном, и растет с увеличением напряженности внешнего магнитного поля, и, как следствие, наблюдается высокое значение магнетосопротивления. Это означает, что в отожженном образце большая часть носителей локализована в кластерах и исключена из обменного взаимодействия [4]. Особенности можно проследить при 24 % концентрации манганита (*T*=267 К) (см. рис. 1г). В остальном величина критической температуры практически не менялась от объемной доли LCMO.

Анализ полученного результата и данные из работы [5] показали, что допирования La в составе, даже в отсутствии внешнего поля *H*, вносит в структуру сверхпроводника парамагнитную особенность, а при подключении *H* существенно ее проявляет. Можно сделать предположение, что вследствие возникающих термических флуктуаций внутри структуры электроны смещаются в атомной решетке кристаллов, что приводит к искажению межатомных связей, что, в свою очередь, свидетельствует о фазовом переходе второго рода.

Особенности структурных изменений с включением Fe.

Последние 10 лет особый интерес представляют сверхпроводники на основе железа. Экспериментальные исследования и теоретические расчеты показывают, что селенид железа обладает практически такими же магнитными и сверхпроводящими свойствами, как и открытые в начале 2008 года ReOFeAs. Более того, как показали американские ученые, FeSe является представителем целого сверхпроводящего семейства FeX (X=Se, Te, S). Простота кристаллической решетки и нетоксичность соединений

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

FeX должны помочь в изучении и предсказании сверхпроводящих характеристик веществ, содержащих железо.

Ученые из Окриджской национальной лаборатории провели теоретическое исследование свойств новой группы сверхпроводников FeX, применяя широко распространенный метод в физике твердого тела – теорию функционала плотности, – и показали, что эти вещества обладают такими же структурными, магнитными и электрон-фононными эффектами, как и открытые первыми железные оксипниктиды. В частности, при температурах, в несколько раз превышающих T_S (для FeSe – при температуре около 105 К), кристаллическая решетка меняет свой тип симметрии с тетрагональной на триклинную (для железных оксипниктидов и соединений AFe_2As_2 происходит смена типа симметрии решетки с тетрагональной на орторомбическую при температурах, близких к 100 К, например для LaOFeAs-системы при 150 К, а в случае с $BaFe_2As_2$ при 140 К). В работе [7] американские ученые подробно рассмотрели кристаллическую структуру FeX, и пришли к выводу, что она значительно проще остальных железных сверхпроводящих соединений. Второй вывод был о том, что основные физические процессы происходят в тетрагональных плоскостях FeX и наличие атомной плоскости оксипниктида не играет какой-либо роли при попытках объяснения сверхпроводящих свойств ReOFeAs. Это, по мнению авторов, дает возможность безопасного синтеза оксипниктидов. Кроме того, приводится кристаллическая структура железных оксипниктидов на примере LaOFeAs, $BaFe_2As_2$ и FeSe. Однако необходимо понимать, что это теоретическое представление, а на практике все не совсем так. Авторы утверждали выше, что любой гибридный состав вещества представляет собой неидеальную структуру, где примеси занимают различные зоны дислокации в кристаллической решетке и незначительное изменение их концентраций существенно повлияет на его свойства.

В экспериментах над железосодержащим сверхпроводником был использован состав BaFeCoAs, синтезированного в виде пленки и монокристалла.

Как известно, в кристалле межатомные расстояния, вследствие упорядочения, оказываются неравными по различным направлениям. Неодинаковые силы взаимодействия, асимметрия молекул – все это является причиной анизотропии. В поликристалле структура образована агрегатным состоянием большого количества монокристаллов, «склеенных» между собой и беспорядочно ориентированных, поэтому анизотропия практически отсутствует.

Поэтому для оценки изменения кристаллической решетки под действием термоупругих искажений измерения проводились в двух векторных направлениях. В направлении плоскости *ab* (рис. 2а, б) при пропускании транспортного тока

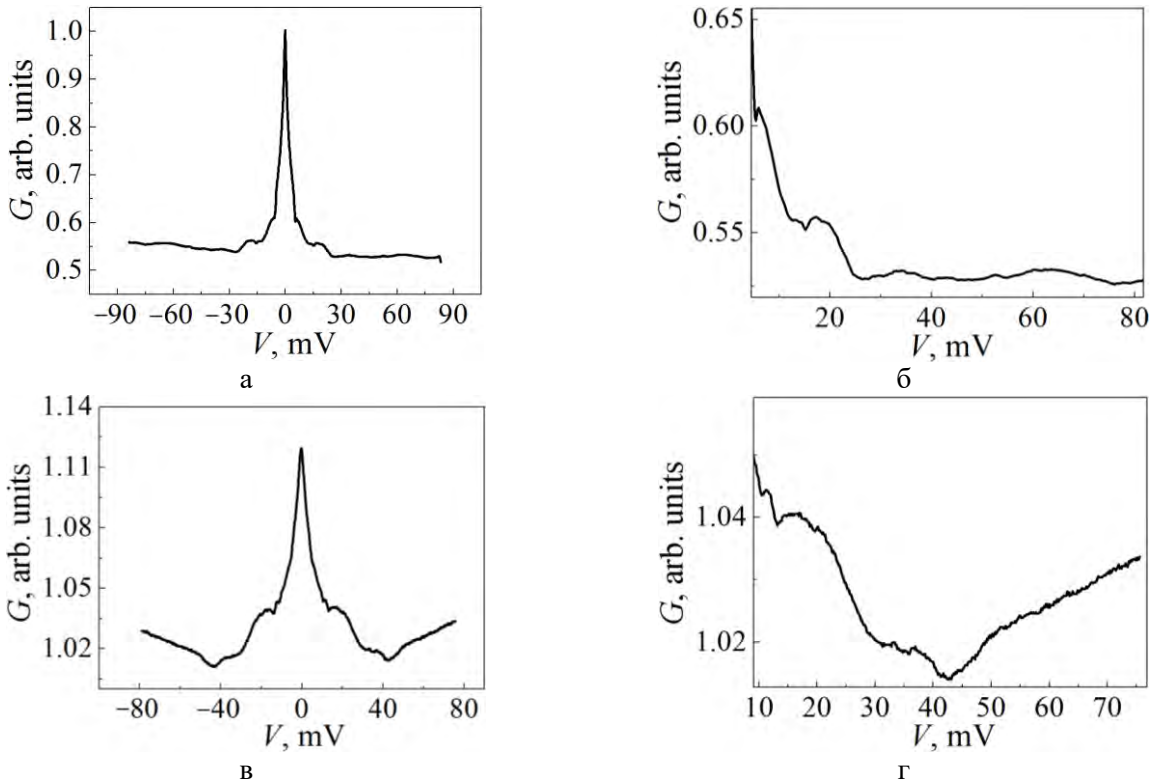


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика проводимости BaFeCoAs:
а, *б* – направление *ab*; *в*, *г* – направление *c*

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

I=1 мА наблюдаем плавный рост проводимости, характерный для полупроводника (от V=25 мВ до V=5,7 мВ). В направлении c эта область увеличилась с 40 до 10 мВ. Однако увеличилась и центральная зона, которая имеет металлический характер проводимости. Таким образом, этот результат позволяет сделать вывод, что внутренняя структура является анизотропной по своей природе и имеет свойство термоупругости, что влияет на электрон-фононное взаимодействие и энергию связи. Это еще раз указывает на то, что основу формирования этих взаимодействий вносит ячейка кристалла. Она же является первопричиной в возникновении полупроводниковой и металлической области проводимости в структуре, и эти области мы наблюдаем на спектрах в момент прохождения тока (электронов) через образец.

В частности, в направлении *ab* заметно увеличение потенциального барьера и, как следствие, меньшая вероятность прохождения электрона через низкоомную металлическую область.

На рис. 3 показана вольт-амперная характеристика контакта BaFeCoAs с ниобием Nb. Сравнивая полученный результат с тем, что был для монокристалла, можно заметить плавное увеличение (V=30 мВ) и резкое падение проводимости в полупроводниковой области (с V=80 мВ до V=8 мВ), что объясняется электрон-фононным взаимодействием и влиянием энергии связи на структуру.

При понижении температуры до 4,2 К (рис. 4) зона сверхпроводящего перехода пленки BaFeCoAs наблюдалась при относительно низкой температуре T_S=18 К, причем в процессе достижения перехода металлическая область выглядит достаточно пологой. Для примера, в [8] образцы состава $Gd_{1-x}Th_xFeAsO$, $SmO_{1-x}F_xFeAs$ показали значения перехода при T_S=55 К и 51 К, что значительно ниже, чем в сверхпроводниках висмута и манганита, где критическая температура перехода была в пределах T_S=90…110 К.

Если посмотреть на варьирование температур перехода в составе на основе Fe, можно заметить, насколько соотношение концентраций влияет на процесс фазового перехода. Это, в свою очередь, еще раз подтверждает, что энергия связи и перераспределение электронов в ячейках кристалла по уровням является одной из причин возникновения эффекта сверхпроводимости. Электронно-фононные спектры и магниторезистивные зависимости, полученные при пропускании транспортного тока через исследуемый образец, это наглядно подтверждают.

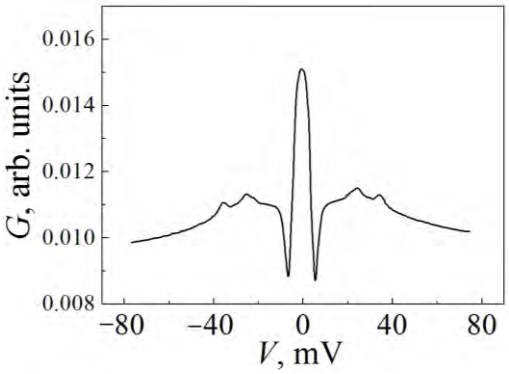


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика контакта Nb и пленки BaFeCoAs

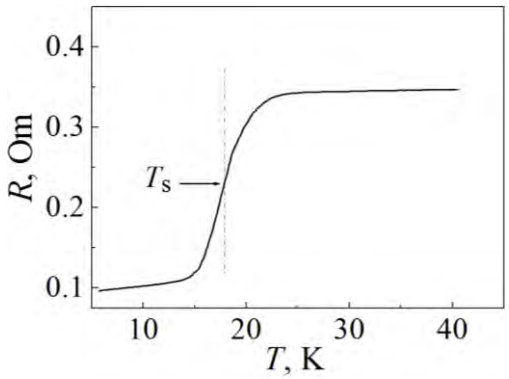


Рис. 4. Кривая $R(T)$ перехода пленки BaFeCoAs-Nb

Выводы

Проведенные измерения в условиях низкой температуры (T=4,2…77 К) позволили установить, что деформационные изменения в кристаллической и поликристалической структуре вызваны термоупругими искажениями в кристалле. При добавлении примеси манганита наблюдались особенности в полупроводниковой области $R(T)$, которая менялась не только от изменения температуры, но и от напряженности внешнего магнитного поля. Паразитное сопротивление, возникающее при подключении образца к установке, минимизируется за счет четырехзондовой схемы подключения к исследуемому образцу.

Транспортный ток, пропускаемый через контакт ниобия с пленкой и монокристаллом пниктида, отображает параметр порядка в структуре и особенности проводимости в момент возникновения сверхпроводящей фазы при T=4,2 К. Как показал эксперимент, протекание электронов через образец зависит от ширины запрещенной зоны, которая образуется вследствие термоупругих деформаций кристаллической решетки.

Список литературы

1. Капица, П.Л. Эксперимент, теория, практика. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 496 с.

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

2. Polyakov, P.I. Laws of Volume Elasticity in Formation of Phase Transitions / P.I. Polyakov. – Düsseldorf: Lambert Academic Publishing, 2018. – 192 p.
3. Urushibara, A. Insulator-metal transition and giant magnetoresistance in $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ / A. Urushibara et al. // Phys. Rev. – 1995. – B.51. – P. 14103.
4. Lofland, S.E. Magnetic transition and electronic transport in colossal magnetoresistance perovskites / S.E. Lofland et al. // Phys. Rev. – 1997. – B.56. – P. 13705.
5. Salamon, M.B. The physics of manganites: Structure and transport. – 2001. – Vol.73. – P. 616-617.
6. Солин, Н.И. Магниторезистивные свойства наноструктурированных магнитных металлов, манганитов и магнитных полупроводников / Н.И. Солин, Л.Н. Ромашев, С.В. Наумов и др. // Журнал технической физики. – 2016. – Вып.2. – Т.86. – С.78-84.
7. Ерин, Ю. Найдено новое семейство сверхпроводников, содержащих железо / Ю. Ерин: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://elementy.ru/novosti_nauki/430899/Naydeno_novoe_semeystvo_sverkhprovodnikov_soderzhashchikh_zhelezo
8. Subedi, A. Density functional study of FeS, FeSe, and FeTe: Electronic structure, magnetism, phonons, and superconductivity / A. Subedi, L. Zhang, D.J. Singh et al. // Phys. Rev. – 2008. – B.78. – P. 134514.

D.O. Fedyuk
Donetsk Institute for Physics and Engineering Named after A.A. Galkin (Donetsk)
P.I. Polyakov
Institute for Physics of Mining Processes (Donetsk)

THE BINDING AND DEFORMATION ENERGY IN THE PROCESSES OF POLYMORPHIC AND PHASE CHANGES

Background. *Analysis of the effect of deformation of the crystal structure is a key to understanding the conductivity of the structure of the material. The objective of this paper is the experimental study of the effect of thermodynamic processes, namely thermoelasticity, on the conductivity of crystals having a superconducting phase.*
Materials and/or methods. *Measure the transport and current-voltage characteristics of films and crystals of pnictide, yttrium polycrystals, with an admixture of manganite, at the temperature of liquid nitrogen and helium. The measuring device, which consists of 2 digital voltmeters H-300 and a scanner connected to a PC, allows obtaining with high accuracy the required indications, and a four-probe method of connecting samples eliminating the parasitic effect of contact resistance on the desired result.*
Results. *During the experiment, found that the introduction of manganite impurities into the initial fraction of the $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ polycrystal and the action of a constant magnetic field significantly affect the structure and phase transition from the semiconductor to the superconductor at T=110 K. For pnictides, there were significant differences in the conductivity between the FeSeTe monocrystal and the BaFeCoAs film. It was possible to trace this by contacting the samples with Nb, and to visually evaluate the electron-phonon conduction spectrum at a temperature of T=4.2 K.*
Conclusion. *The results of measurements of samples of polycrystals and films under the influence of low temperatures and a magnetic field presented. To carry out the experiment, an appropriate methodology developed.*

Keywords: *thermoelasticity, barometrical elasticity, magnetic field, magnetostriction, manganite, pnictide, single crystal, polycrystalline, binding energy.*

Сведения об авторах

Д.О. Федюк
Телефон: +380 (71) 340-02-80
Эл.почта: fedykdim@gmail.com

П.И. Поляков
Телефон: +380 (62) 311-52-85
Эл.почта: poljakov@fti.ac.donetsk.ua

Статья поступила 16.11.2018 г.
© Д.О. Федюк, П.И. Поляков, 2018
Рецензент д.т.н., проф. Э.Г. Куренный

УДК 622.8:621.3

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

О ВЛИЯНИИ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА В ШАХТНОЙ УЧАСТКОВОЙ СЕТИ НА ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ

Исследовано быстродействие работы алгоритма определения поврежденной фазы в шахтной сети с изолированной нейтралью в условиях воздействия помех и искажений реальной сети, обусловленных ее динамическим режимом при возникновении утечки. Установлено, что наиболее весомым фактором, влияющим на время идентификации поврежденной фазы, является сопротивление цепи утечки.

Ключевые слова: *защитное шунтирование, поврежденная фаза, ток утечки, устройство выбора фазы, переходный процесс.*

Постановка проблемы

Существующая тенденция к повышению требований по защите человека, заключающаяся, в частности, в снижении допустимой величины напряжения касания [1], требует новых технических решений по охране труда. Применительно к участковой шахтной сети (U=660 или 1140 В, нейтраль изолирована, емкость «фаза – земля» до 1 мкФ). Таким решением является защитное шунтирование поврежденной фазы, заключающееся в ее автоматическом соединении с заземляющим устройством [2]. Это, в свою очередь, требует надежной работы и высокого быстродействия устройства определения (выбора) поврежденной фазы (УВФ).

В [3] предложен алгоритм идентификации поврежденной фазы по двум мгновенным значениям потенциала нейтрали $u_N(t_1)$, и $u_N(t_2)$, снятым для двух смежных значений аргумента ωt_1 и ωt_2, разница между которыми $\Delta\omega t$ фиксирована и находится в пределах от 10 до 20 градусов. В качестве опорного напряжения, задающего отсчет времени (или угла), удобно принять одно из линейных напряжений, например u_{AB}.

Требования к УВФ достаточно жесткие и в определенной мере противоречивые. С одной стороны, возможное пребывание человека под фазным напряжением требует максимального быстродействия. С другой стороны, ошибочное определение поврежденной фазы при еще не отключенной сети может привести к развитию аварийной ситуации, недопустимой в шахтных условиях [4].

Анализ последних исследований и публикаций

Учитывая неоспоримые преимущества защитного шунтирования, его применение уже сейчас находит отражение в нормативных документах по обеспечению электробезопасности при разработке подземных и открытых месторождений полезных ископаемых некоторых стран мира [5].

Отечественные научно-исследовательские и промышленные предприятия интенсивно начали осваивать применение систем шунтирования поврежденной фазы [6], однако не более как дополнение к защитному отключению, которое является основной мерой обеспечения электробезопасности.

Цель (задачи) исследования

Целью работы является, учитывая требование максимально быстрой идентификации поврежденной фазы, исследовать работоспособность и быстродействие предложенного алгоритма в условиях, когда в составе потенциала нейтрали есть динамические составляющие, обусловленные переходным процессом при возникновении утечки.

Основной материал исследования

Упрощенная схема замещения шахтной участковой сети (рис. 1) содержит: сопротивления изоляции и емкости фаз кабелей по отношению к земле R, C; эквивалентные параметры трехфазного источника питания e, r_0, L_0; эквивалентные параметры потребителей участка $r_н$, $L_н$; сопротивление утечки (в частности, сопротивление тела человека) R_h. При ее анализе в установившемся режиме однофазной утечки не учитываются продольные сопротивления кабелей (активные сопротивления и индуктивности), межвитковые емкости машин и трансформаторов, а также волновые процессы в кабельных коммуникациях.

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

$$\frac{d\Psi_0}{dt} = -\frac{1}{C}\left(\frac{\Psi_0}{R} + \frac{u_A}{3 \cdot R_h}\right),$$

$$\frac{du_A}{dt} = \frac{1}{C}\left(i_{0A} - i_{HA} - \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_h}\right) \cdot u_A\right),$$

$$\frac{di_{0A}}{dt} = \frac{1}{L_0}\left(e_A + \Psi_0 - i_{0A} \cdot r_0 - u_A\right), \qquad (1)$$

$$\frac{di_{HA}}{dt} = \frac{1}{L_H}\left(-\Psi_0 + u_A - i_{HA} \cdot r_H\right),$$

где Ψ_0 – потенциал (относительно земли) нейтрали источника питания; u_A, u_B, u_C – фазные напряжения.

Предварительный анализ показал, что характеристическое уравнение системы (1) в рабочей области параметров содержит два комплексных корня с частотой свободных колебаний от 7 до 20 кГц и два действительных корня, величина которых составляет от нескольких десятков до нескольких сотен. Однако динамическая составляющая потенциала нейтрали определяется, по сути, только одним из действительных корней, а постоянная интегрирования, связанная с другим действительным корнем, в десятки и сотни раз меньше. Что же касается высокочастотных колебаний, обусловленных комплексными корнями, то они почти не проявляют себя в составе потенциала нейтрали, что объясняется шунтирующим действием емкости «фаза – земля». Фактически это значит, что длительность переходного процесса можно характеризовать только одним действительным корнем или, вернее, величиной ему обратной и взятой по модулю (постоянной времени) $\tau=1/|p|$.

Методика исследования заключается в сопоставлении значений аргумента потенциала нейтрали, полученных из анализа установившегося режима цепи рис. 1 и переходного режима, в котором проявляется влияние динамической составляющей. Порядок численного эксперимента следующий:

1. Для момента времени t_1 с момента коммутации исследуется переходный процесс цепи рис. 1 при возникновении утечки (начальная фаза источника питания выбирается из условия наибольшей интенсивности переходного процесса). Определяются фактические значения величин $u_{N\Phi}(t_1)$, $u_{N\Phi}(t_2)$ с учетом погрешностей, вносимых динамическим процессом.

2. Путем моделирования работы УВФ вычисляется отношение входных данных и расчетное значение амплитуды потенциала нейтрали $Um_{расч}$ (эти данные используются для косвенной оценки работоспособности алгоритма работы УВФ в условиях динамических возмущений).

3. Проверяется условие $0{,}1<u_{N\Phi}(t_1)/u_{N\Phi}(t_2)<10$, при выполнении которого вычисляется расчетное значение аргумента потенциала нейтрали $\psi_{расч}$. При невыполнении этого условия в данной модели значение $\psi_{расч}$ обнуляется, а в реальном устройстве входные данные игнорируются, и идентификация продолжается уже при новых данных.

4. Опыты 1…3 повторяются для всего интервала длительности переходного процесса, в различных фазах и при различных значениях сопротивления утечки R_h.

5. Для установившегося симметричного режима цепи рис. 1 определяются фактическое значение аргумента потенциала нейтрали $\psi_{фак}$ для данного R_h и устанавливаются его граничные значения $\psi_{гр}$ для интервала $0<R_h<\infty$.

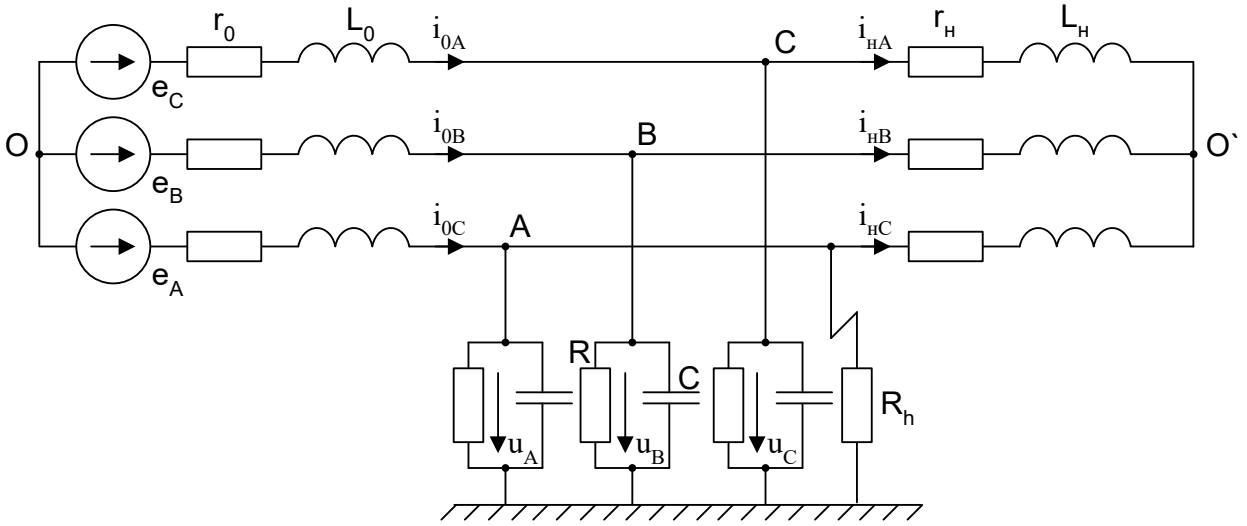


Рис. 1. Схема замещения участковой шахтной сети

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

Условия экспериментов: U=660 В, C=0,75 мкФ, R=100 кОм, R_h меняется от 10 Ом до 25 кОм. Момент коммутации подбирается из условия наиболее интенсивного переходного процесса.

На рис. 2 приведены результаты первой серии численных экспериментов (утечка в фазе А, R_h=2,5 кОм, наибольшая постоянная времени τ=0,0049 с (88 эл. градусов), начальная фаза эдс E_A в момент коммутации – 50°, значение аргумента потенциала нейтрали без возмущения $\psi_{фак}$=123°, его амплитуда 256 В, допустимые границы изменения аргумента $\psi_{гр}$ от 25° до 145°).

На рис. 2а приведены: расчетное $\psi_{расч}$ и фактическое $\psi_{фак}$ значения аргумента потенциала нейтрали, их допустимые границы $\psi_{гр}$, а также отношение входных величин $u_{N\Phi}(t_1)/u_{N\Phi}(t_2)$ (масштаб увеличен в 100 раз). Справа приведены кривые потенциала нейтрали $u_N(t)$ в переходном режиме, его установившаяся $u_{Nуст}(t)$ и свободная $u_{Nсв}(t)$ составляющие, а также расчетное значение амплитуды потенциала нейтрали $Um_{расч}$, по знаку которой отбрасывается «лишний» корень $\psi_{расч}$ [3].

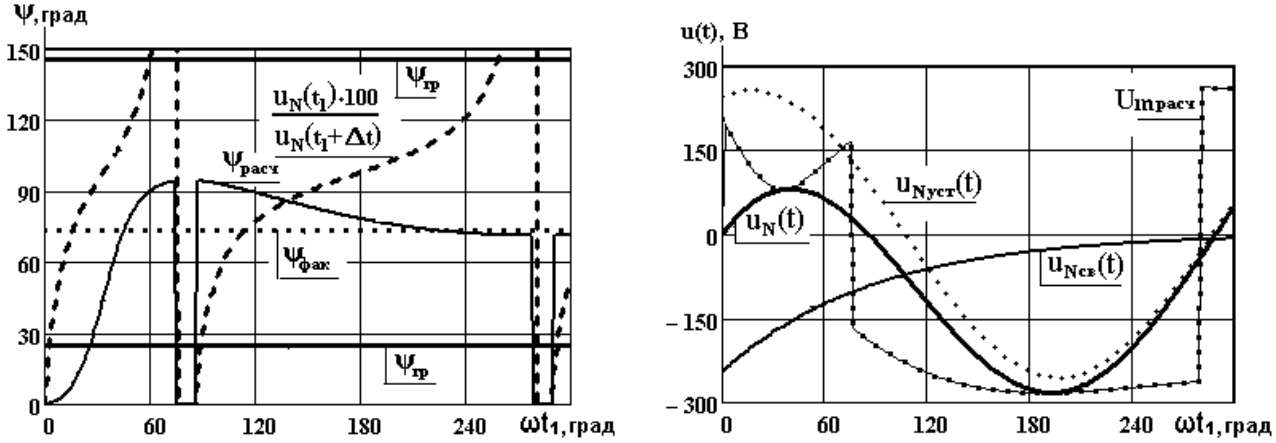
Проанализируем возможные варианты работы УВФ на основании кривых рис. 2. На начальном участке (0<ωt<40°) происходит интенсивный рост потенциала нейтрали. Сигнал на запуск УВФ может быть подан уже при значении ωt от 25° до 30°. Ближайший переход потенциала нейтрали через нуль соответствует моменту ωt≈70°. Это значит, что для идентификации имеется интервал от 40° до 75°. Этого интервала достаточно для получения трех различных значений $\psi_{расч}$, и, поскольку, все они находятся в области от 25° до 125°, принять решение о шунтировании фазы А. В этом случае время определения поврежденной фазы с момента коммутации составляет приблизительно 70° (4 мс).

Представим, однако, худшую ситуацию, когда времени для трехкратной идентификации на начальной стадии переходного процесса оказалось недостаточно. Это может произойти по двум причинам.

Во-первых, прежде чем будут выполнены три опыта, дающие одинаковые результаты, наступает «неблагоприятная» область, где потенциал нейтрали оказывается вблизи нуля и условия п. 2 не выполняются. При этом входные данные алгоритмом игнорируются, а повторная трехкратная идентификация задерживается до наступления следующей «благоприятной» области (на рис. 2 это ωt>95°). Задержка в принятии решения на защитное шунтирование составляет около 70° (4 мс).

Во-вторых, первая идентификация на начальном участке из-за существенного динамического возмущения может оказаться ложной (это нельзя исключить). В этом случае ее результат не совпадает с результатами двух последующих. Поскольку для принятия решения необходимы одинаковые результаты трех, следующих друг за другом опытов, то при наступлении «нерабочей» области результаты, полученные на начальной стадии, отбрасываются. Повторяется предыдущая ситуация: идентификация задерживается до новой «благоприятной» области. И в этом случае задержка составляет приблизительно 70° (4 мс).

Таким образом, вне зависимости от причины, по которой трехкратная идентификация на первом этапе не состоялась, мы получаем задержку, в результате которой время принятия решения на защитное шунтирование достигает около 150° (8 мс).



а б

Рис. 2. Результаты третьей серии опытов, R_h=2,5 кОм:
а – сопоставление фактических и вычисленных аргументов потенциала нейтрали;
б – кривые переходного процесса

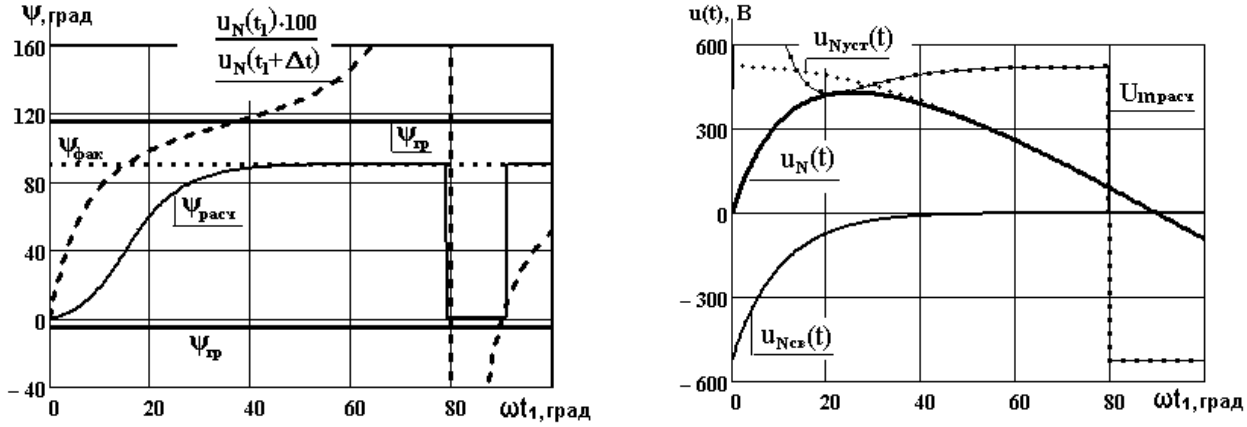
ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Если для защитного шунтирования применить тиристоры, то полное время срабатывания защиты при благоприятном варианте составит от 8 до 15 мс, а в худшем варианте может затянуться до 20 мс. Но даже это время в 10 раз меньше нормированного времени защитного отключения согласно [7].

На рис. 3 приведены результаты еще одной серии численных экспериментов (утечка в фазе А, R_h=250 Ом, наибольшая постоянная времени τ=0,55 мс (10 эл. градусов), начальная фаза эдс E_A в момент коммутации – 80°, значение аргумента потенциала нейтрали без возмущения $\psi_{фак}$=90,1°, его амплитуда 523 В, допустимые границы изменения аргумента $\psi_{гр}$ от -5° до 115°). Обозначения на рисунках те же, что и в предыдущей серии опытов.

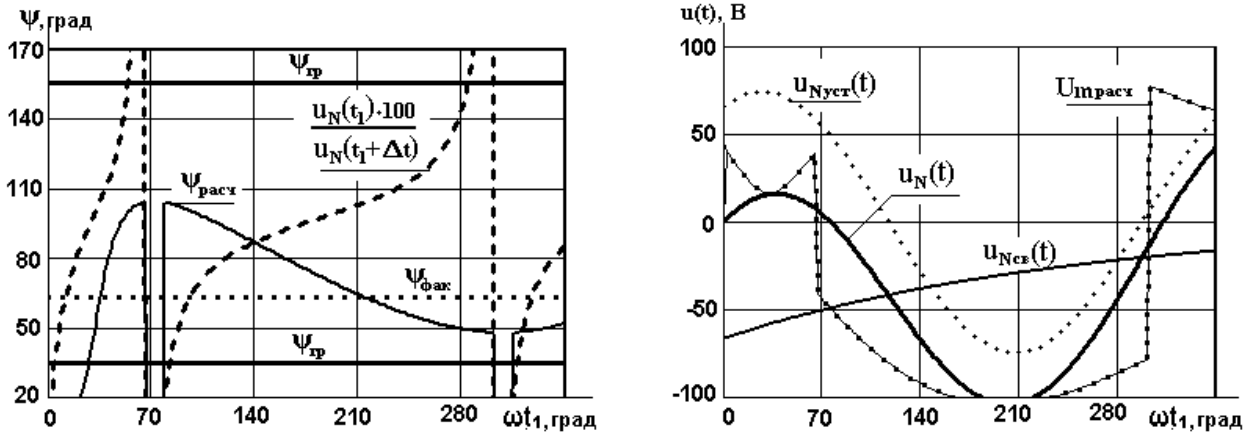
Переходный процесс весьма скоротечен. Сигнал на запуск алгоритма подается уже через 10° с момента коммутации, а еще через 40…45° выполняется серия из трех промежуточных данных об аргументе потенциала нейтрали для идентификации. Вероятность задержек из-за ложной идентификации ничтожна, так как расчетное значение аргумента потенциала нейтрали находится в пределах своих границ в отличие от первой серии опытов (см. рис. 2 интервал ωt<20°). Характерно то, что уже через 40° расчетное и фактическое значения аргумента потенциала нейтрали практически совпадают. Таким образом, уменьшение сопротивления утечки более благоприятно для ускоренной идентификации поврежденной фазы. Минимальное время идентификации составляет около 3 мс с момента коммутации.

Рассмотрим результаты аналогичных исследований при R_h=10 кОм, представленные на рис. 4 (R_h=10 кОм, наибольшая постоянная времени τ=14 мс (253 эл. градусов), начальная фаза эдс E_A в момент коммутации – 40°, значение аргумента потенциала нейтрали без возмущения $\psi_{фак}$=63°, его амплитуда 74 В, допустимые границы



а б

Рис. 3. Результаты второй серии опытов, R_h=250 Ом:
а – сопоставление фактических и вычисленных аргументов потенциала нейтрали;
б – кривые переходного процесса



а б

Рис. 4. Результаты третьей серии опытов, R_h=10 кОм:
а – сопоставление фактических и вычисленных аргументов потенциала нейтрали;
б – кривые переходного процесса

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

изменения аргумента $\psi_{гр}$ от 35° до 155°). Обозначения на рисунках те же, что и в предыдущих опытах.

Переходный процесс затянувшийся. Его практическая длительность около 50 мс. На первой его стадии (до 120° с момента коммутации) потенциал нейтрали недостаточен для запуска УВФ. Обусловленная этим задержка составляет до 8 мс.

Однако далее, на интервале от 130° до 200° условия для трехкратной идентификации и принятия решения благоприятные. Во-первых, расчетное значение аргумента $\psi_{расч}$ находится в рабочей зоне, плавно изменяется, приближаясь к его фактическому значению $\psi_{фак}$. Во-вторых, отношение входных данных $u_{N\Phi}(t_1)$, $u_{N\Phi}(t_2)$ не имеет «прыжков» и разрывов и находится в благоприятном интервале от 0,8 до 1,4. В-третьих, расчетное значение $Um_{расч}$, позволяющее выбрать нужный корень при определении $\psi_{расч}$, также не имеет разрывов и не меняет своего знака. Это позволяет алгоритму уже через 45°…50° надежно определить поврежденную фазу и принять решение на защитное шунтирование. Полное время решения задачи идентификации находится в пределах от 10 до 11 мс. Это время практически то же, что и в первой серии опытов.

Таким образом, результаты третьей серии численных экспериментов при достаточно большом сопротивлении утечки показали, что УВФ, работая по предложенному алгоритму, устойчиво и надежно определяет фазу, в которой произошла утечка, причем время идентификации при наиболее неблагоприятной ситуации не превышает половину периода питающего напряжения (0,01 с).

Выводы

Выполнено исследование работоспособности алгоритма идентификации поврежденной фазы шахтной участковой сети, основанное на определении аргумента потенциала нейтрали по двум его мгновенным значениям, в условиях динамических возмущений вследствие переходного режима при возникновении утечки. Исследование построено на моделировании динамики сети с одновременным моделированием алгоритма идентификации фазы с утечкой. Сопротивление утечки варьировалось в пределах от 0,25 до 10 кОм.

Установлено:

– предложенный алгоритм обеспечивает устойчивую и надежную идентификацию поврежденной фазы на всем исследованном диапазоне изменения сопротивления утечки;

– максимальное время идентификации при наиболее неблагоприятных условиях не превышает 11 мс;

– уменьшение сопротивления утечки (R_h<0,25 кОм) более благоприятно для ускорения идентификации. Время определения поврежденной фазы может быть уменьшено до 3 мс.

Список литературы

1. High voltage mining equipment for use underground: handbook. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2007. – 68 p.
2. Щуцкий, В.И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / В.И. Щуцкий, В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин // М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
3. Чорноус, Е.В. Об альтернативном варианте защиты шахтной сети от тока утечки / Электричество. – 2009. – №8. – С. 33-36.
4. Чорноус, Е.В. Моделирование режима заземляющего контура при двухфазном замыкании шахтной участковой сети в разнесенных точках / Донбас-2020: наука і техніка – виробництву: ІІ науково-практична конференція, 03-04 лютого 2004 року.: зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – С. 353-357.
5. AS/NZS 2081.3:2002 Electrical equipment for coal and shale mines. Electrical protection devices – Part 3: Earth-leakage protection systems for use on earth-fault current limited systems (IT systems). – Jointly published by Standards Australia International Ltd, GPO Box 5420, Sydney, NSW 2001 and standards New Zealand, Private Bag 2439, Wellington 6020. – ISBN 0 7337 4749 3; 12 August 2002.
6. Савицкий, А.В. Микроконтроллерные аппараты защиты от токов утечек на землю в шахтных распределительных сетях напряжением до 1200 В / А.В. Савицкий, В.Н. Савицкий, А.И. Белошистов // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2013. – С. 83-96.
7. Правила безопасности в угольных шахтах. С изменениями, внесенными на основании Приказа Министерства угля и энергетики Донецкой Народной Республики, Государственного Комитета горного и технического надзора Донецкой Народной Республики от 07.07.2016 №63/319, от 20.06.2017 №157/291. Регистрационный №1284 от 17 мая 2016 г. – Государственная информационная система нормативно-правовых актов Донецкой Народной Республики. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://gisnpa-dnr.ru/npa/0024-0105-36-208-20160418/

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

E.V. Chornous
Donetsk National Technical University (Donetsk)

ON THE IMPACT OF THE TRANSITIONAL MODE IN THE MINE SITE NETWORK ON DAMAGED PHASE TIME DEFINITION

Background. *Protective shunting is becoming increasingly important in the modern concept of electrical safety of mine electrical networks. The most stringent requirements for reliability and speed imposed on the devices for selecting the damaged phase. In this regard, investigated the efficiency and speed of the previously proposed algorithm for determining the damaged phase under conditions when the neutral potential contains dynamic components determined by the transient process in the event of a leak.*
Materials and/or methods. *For this purpose, the mathematical model of the mine network used to calculate the argument of the neutral potential taking into account the dynamic components and compared with its actual value and the boundaries of the reference phase intervals. The identification time determined by obtaining three consecutive calculated values of the neutral potential argument corresponding to the reference phase interval. The study performed for different values of leakage resistance.*
Results. *Established that the algorithm provides reliable identification in the case of leakage resistance up to 10 kOhm in a time of not more than 11 ms. Also, the regularity of increasing the operating speed while reducing the leakage resistance revealed.*
Conclusion. *In the conditions of increasing the requirements for electrical safety, as well as the increasing power and voltage classes of mine electrical equipment, the proposed algorithm can provide a reliable and rapid determination of the damaged phase for its subsequent shunting, thereby reducing the value of the leakage current up to zero.*

Keywords: *protective shunting, damaged phase, leakage current, phase selection device, transition process.*

Сведения об авторе
Е.В. Чорноус
SPIN-код: 9090-8141
Телефон: +380 (62) 305-23-58
Эл. почта: emitoe@yandex.ru

Статья поступила 07.12.2018 г.
© Е.В. Чорноус, 2018
Рецензент д.т.н, доц. И.А. Бершадский



УДК 621.746.27

А.Б. Бирюков /д.т.н./, И.К. Кольба
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАЛЛА

Исследована параметрическая чувствительность системы диагностики окалинообразования металла при его тепловой обработке, базирующейся на обратном методе расчета. Проанализировано влияние концентрации кислорода в продуктах сгорания в районе пламенного окна и в районе рекуператора, расхода топлива, расхода воздуха, повышения температуры воздуха в рекуператоре на искомые величины. Полученные результаты позволяют осознанно выбирать классы точности приборов для измерения входных величин, при которых будут получены приемлемые погрешности определения искомых величин.

Ключевые слова: *нагрев металла, окалинообразование, потери металла, система диагностики, погрешность измерения.*

Постановка проблемы

Тепловая обработка металла в пламенных печах сопровождается процессом образования окалины на поверхности металла, в результате чего имеют место потери металла и изменяются условия теплопередачи в печной камере [1,2]. Процессы окалинообразования в условиях высоких температур активно изучаются более ста лет, что позволило достаточно глубоко уяснить физико-химическую сущность и количественные закономерности протекания этих процессов [3,4].

При проектировании новой печи и составлении технологической карты, соответствующей номинальным условиям ее эксплуатации, как правило, расчетным способом оцениваются потери металла с окалиной.

Однако зачастую реальные технологические параметры эксплуатации печи отличаются от номинальных, а использование обычных расчетных методик затруднительно, поскольку в общем случае нет информации о текущих значениях всех факторов, влияющих на окалинообразование [5,6,7].

Анализ последних исследований и публикаций

В этом случае потери металла могут быть оценены при помощи систем диагностики. Такая система диагностики может быть реализована на базе прямых, обратных или комплексных методов [8]. Прямые методы базируются на использовании прогнозной математической модели [9], рассчитывающей в режиме реального времени температурное поле металла и образование окалины в зависимости от текущих значений температур по зонам печи, ее производительности и т.д. Действительно, такой подход справедлив, но он требует мощных вычислительных ресурсов. Помимо этого, итоговые величины напрямую зависят от точности заданных констант скорости реакций окисления для определенной марки стали.

Обратные методы основаны на рассмотрении баланса кислорода в камере и газоходах печи и определении текущих значений расхода кислорода. В рамках предложенной в работе [10] системы диагностики рассматриваются следующие источники поступления кислорода в печную систему: вентиляторный воздух, подаваемый на горелки; подсасываемый в камеру печи атмосферный воздух; подсасываемый в газоходы атмосферный воздух. При создании системы диагностики принято допущение о том, что кислород расходуется только по реакциям горения, а также на окисление и обезуглероживание металла.

В рамках данной системы диагностики определяются следующие величины: текущие значения подсоса воздуха в топку, в газоходы, текущие значения подсоса воздуха на участке газохода от пламенного окна до рекуператора и текущий расход кислорода на окисление металла. Искомые величины определяются в результате решения соответствующей системы уравнений. Величины, входящие в уравнения как аргументы, определяются на основании текущей информации от чувствительных элементов.

Одним из серьезных преимуществ данной системы диагностики является сравнительная простота математического аппарата. Однако для перехода к ее практическому использованию необходимо пройти процедуру оценки параметрической чувствительности.

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

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является оценка параметрической чувствительности системы диагностики процессов окалинообразования при тепловой обработке металла в печах, базирующейся на обратном методе.

Основной материал исследования

Схема расстановки чувствительных элементов для реализации создаваемого компонента диагностики процессов окисления металла на примере печи периодического действия приведена на рис. 1.

Рассматриваемая система диагностики процессов окисления металла базируется на основании решений следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} V_m \cdot V_{nc} + V_{под}^m + V_{под}^z - V_{ок}^{O_2} = \\ = \dfrac{V_в \cdot c_в \left(\dfrac{t_в^{вх} + t_в^{вых}}{2} \right) \cdot (t_в^{вых} - t_в^{вх})}{(t_{nc}^{вх} - t_{nc}^{вых}) \cdot \sum\limits_{i=1}^{n} C_i^{ком} \cdot c_i^{ком} \left(\dfrac{t_{nc}^{вх} + t_{nc}^{вых}}{2} \right)}, \\ C_{O_2}^o = \dfrac{V_m \cdot V_{nc} \cdot C_{O_2}^{nc} + V_{под}^m \cdot C_{O_2}^{ва} - V_{ок}^{O_2}}{V_m \cdot V_{nc} + V_{под}^m - V_{ок}^{O_2}}, \\ C_{O_2}^p = \dfrac{V_m \cdot V_{nc} \cdot C_{O_2}^{nc} + V_{под}^m \cdot C_{O_2}^{ва} + V_{под}^z \cdot C_{O_2}^{ва} - V_{ок}^{O_2}}{V_m \cdot V_{nc} + V_{под}^m + V_{под}^z - V_{ок}^{O_2}}, \end{cases} \quad (1)$$

где V_m – текущий расход топлива, м^3/с; $V_в$ – текущий расход воздуха, м^3/с; $t_в^{вх}$, $t_в^{вых}$ – температура

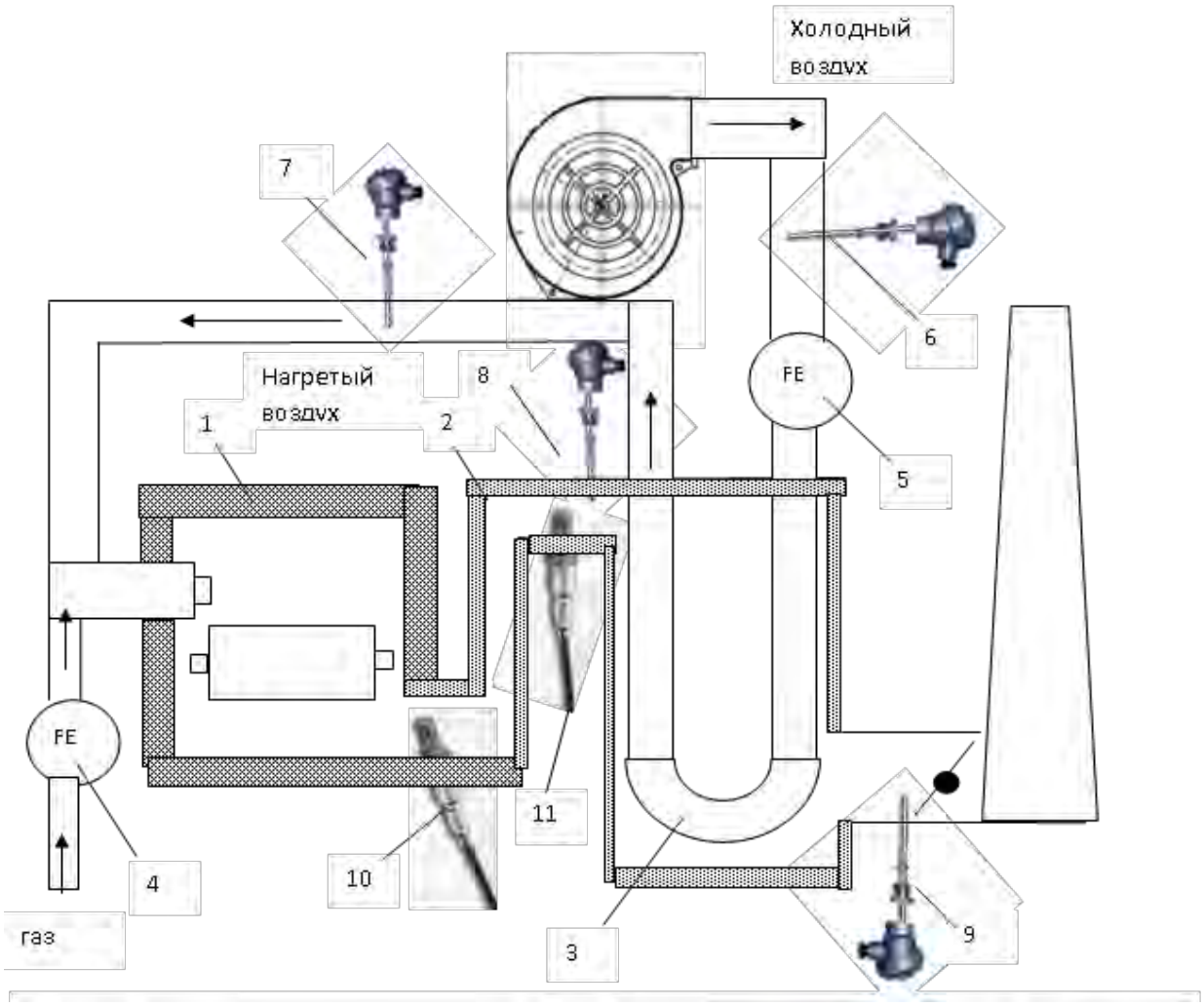


Рис. 1. Схема сбора информации от первичных датчиков
для системы диагностики процессов окисления в печи периодического действия:
1 – камера печи; *2* – участок газохода от камеры печи до рекуператора; *3* – рекуператор;
4, 5 – расходомеры по топливу и воздуху соответственно; *6, 7* – термопары для измерения
температуры холодного и нагретого воздуха соответственно; *8, 9* – термопары для измерения
температуры продуктов сгорания до и после рекуператора соответственно;
10, 11 – датчики концентрации кислорода в районе пламенного окна
и перед рекуператором соответственно

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

воздуха на входе и выходе из рекуператора, °С; $t_{пс}^{вх}$, $t_{пс}^{вых}$ – температуры продуктов сгорания на входе и выходе из рекуператора, °С; $C_{O_2}^{o}, C_{O_2}^{p}$ – концентрации кислорода в продуктах сгорания в районе пламенного окна и перед рекуператором, %; $V^{m}_{под}$, $V^{г}_{под}$ – расход воздуха, подсасываемого в топку и газоход, м^3/с; $V_{ок}^{O_2}$ – расход кислорода, идущего на окисление металла, м^3/с; $c_в$ – теплоемкость воздуха, идущего на горение, Дж/(м^3·К); $C_i^{ком}$ – объемная концентрация i-го компонента газовой среды перед рекуператором; $c_i^{ком}$ – теплоемкость i-го компонента газовой среды при средней температуре его пребывания в рекуператоре, Дж/(м^3·К); $C_{O_2}^{пс}$ – объемная концентрация кислорода в продуктах сгорания, определяемая на основании стандартных подходов теории горения топлива; $C_{O_2}^{ва}$ – объемная концентрация кислорода в атмосферном воздухе; $V_{пс}$ – удельный выход продуктов сгорания, м^3/м^3.

Значения концентраций компонентов продуктов сгорания перед рекуператором для уравнения (1) определяются при помощи следующих выражений:

$$C_{CO_2}^{ком} = \frac{V_m \cdot V_{пс} \cdot C_{CO_2}^{пс}}{V_m \cdot V_{пс} + V_{под}^{m} + V_{под}^{г} - V_{ок}^{O_2}},$$

$$C_{H_2O}^{ком} = \frac{V_m \cdot V_{пс} \cdot C_{H_2O}^{пс} + 0{,}00124 \cdot (V_{под}^{m} + V_{под}^{г}) \cdot d_v}{V_m \cdot V_{пс} + V_{под}^{m} + V_{под}^{г} - V_{ок}^{O_2}},$$

$$C_{O_2}^{ком} = \frac{V_m \cdot V_{пс} \cdot C_{O_2}^{пс} + V_{под}^{m} \cdot C_{O_2}^{ва} + V_{под}^{г} \cdot C_{O_2}^{ва} - V_{ок}^{O_2}}{V_m \cdot V_{пс} + V_{под}^{m} + V_{под}^{г} - V_{ок}^{O_2}},$$

$$C_{N_2}^{ком} = \frac{V_m \cdot V_{пс} \cdot C_{N_2}^{пс} + V_{под}^{m} \cdot C_{N_2}^{ва} + V_{под}^{г} \cdot C_{N_2}^{ва}}{V_m \cdot V_{пс} + V_{под}^{m} + V_{под}^{г} - V_{ок}^{O_2}},$$

где d_v – абсолютное влагосодержание воздуха, г/м^3; $C_{O_2}^{пс}$, $C_{H_2O}^{пс}$, $C_{CO_2}^{пс}$, $C_{N_2}^{пс}$ – объемные концентрации углекислоты, водяных паров, кислорода и азота в продуктах сгорания, определяемые на основании стандартных подходов теории горения топлива.

В рамках рассматриваемой системы диагностики входными величинами являются: V_m, $V_в$, $t_в^{вх}$, $t_в^{вых}$, $t_{пс}^{вх}$, $t_{пс}^{вых}$, $C_{O_2}^{o}$, $C_{O_2}^{p}$. Результаты представлены следующими величинами: $V^{m}_{под}$, $V^{г}_{под}$, $V_{ок}^{O_2}$.

Оценка параметрической чувствительности проводилась следующим образом. Для каждого из аргументов поочередно проводятся численные эксперименты с искусственно внесенными типовыми погрешностями (значения остальных аргументов остаются на базовом уровне).

Полученные результаты искомых величин сравниваются со своими базовыми значениями, на основании чего выносится суждение о влиянии погрешности того или иного аргумента на результаты работы системы диагностики.

Для исследования был принят следующий базовый набор исходных данных: $V_{пс}$=12,197 м^3/м^3; V_d=11,197 м^3/м^3; CH_4=100 %; ko_2=0,21; α=1,15; d_{v1}=18 г/м^3; V_m=0,8 м^3/с; $V_в$=11,197 м^3/м^3; $t_в^{вх}$=20; $t_в^{вых}$=320; $t_{пс}^{вх}$=750 ºС; $t_{пс}^{вых}$=490 ºС; $C_{O_2}^{o}$=1,8%; $C_{O_2}^{p}$=4 %; $V^{m}_{под}$=0,66 м^3/м^3; $V^{г}_{под}$=1,36 м^3/м^3; $V_{ок}^{O_2}$=0,191 м^3/м^3; ko_2 – коэффициент содержания кислорода; α – коэффициент расхода воздуха; CH_4 – состав газа, %; $V_{пс}$ – удельный расход продуктов сгорания, м^3/м^3.

Базовому набору исходных данных соответствует следующий вектор результатов: $V^{m}_{под}$= =0,66 м^3/м^3; $V^{г}_{под}$=1,36 м^3/м^3; $V_{ок}^{O_2}$=0,191 м^3/м^3.

Анализ уравнения (1) системы показал, что погрешности определения расхода воздуха и подъема его температуры в рекуператоре оказывают одинаковое влияние на результаты решения системы, поскольку присутствуют только в числителе правой части уравнения как равноправные множители. Что касается температур продуктов сгорания в рекуператоре, то они влияют только лишь на значения теплоемкости продуктов сгорания. Поскольку данные зависимости не являются ярко выраженными, обычные для практики погрешности измерения температур не оказывают ощутимого влияния на результаты работы системы диагностики. По этой причине влияние погрешности определения $t_{пс}^{вх}$ и $t_{пс}^{вых}$ не рассматривалось.

С учетом классов точности приборов, которые могут быть использованы для измерения соответствующих величин аргументов, для концентраций кислорода рассматриваются погрешности до 5 %, а для расходов топлива и воздуха до 1 %.

Результаты исследования приведены в табл. 1…4.

Погрешность определения $C_{O_2}^{o}$ совершенно не влияет на расход кислорода на окисление металла, но оказывает умеренное влияние на текущее значение подсоса воздуха в топку и на участок газохода от пламенного окна до рекуператора. При этом для $V^{m}_{под}$ знак отклонения совпа-

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

дает со знаком погрешности $C^o_{O_2}$, а для $V^e_{под}$ они противоположны.

Погрешность определения $C^p_{O_2}$ оказывает сравнительно небольшое влияние на величину подсоса кислорода на участке от пламенного окна до рекуператора, влияет на расход кислорода на окисление и оказывает особо значительное влияние на величину подсоса воздуха в топку. При этом знак погрешности $C^p_{O_2}$ совпадает со знаком отклонения $V^e_{под}$ и противоположен знакам отклонения $V^m_{под}$ и $V^{O_2}_{ок}$.

Погрешность определения V_m оказывает незначительное влияние на участок газохода от пламенного окна до рекуператора, но при этом очень существенно влияет на расход кислорода на окисление металла и, в особенности, на подсос воздуха в топку. При этом знаки погрешности V_m и отклонений $V^m_{под}$ и $V^{O_2}_{ок}$ противоположны.

Табл. 1. Влияние погрешности определения концентрации кислорода в продуктах сгорания в районе пламенного окна на результаты диагностики

Расход		Погрешность измерения концентрации кислорода				
		(+1 %)	(+2 %)	(+3 %)	(+4 %)	(+5 %)
$V^m_{под}$	абс. значение	0,669	0,679	0,689	0,699	0,709
	отн. погрешность	1	2	4	5	6
$V^e_{под}$	абс. значение	1,35	1,34	1,331	1,321	1,311
	отн. погрешность	-0,7	-1	-2	-2	-3
$V^{O_2}_{ок}$	абс. значение	0,191	0,191	0,191	0,191	0,191
	отн. погрешность	0	0	0	0	0

Табл. 2. Влияние погрешности определения концентрации кислорода в продуктах сгорания в районе рекуператора на результаты диагностики

Расход		Погрешности измерения концентрации кислорода				
		(+1 %)	(+2 %)	(+3 %)	(+4 %)	(+5 %)
$V^m_{под}$	абс. значение	0,629	0,598	0,567	0,536	0,506
	отн. погрешность	-4	-10	-16	-18	-30
$V^e_{под}$	абс. значение	1,385	1,409	1,434	1,459	1,484
	отн. погрешность	1	3	5	7	8
$V^{O_2}_{ок}$	абс. значение	0,186	0,18	0,174	0,168	0,162
	отн. погрешность	-2	-6	-9	-12	-17

Табл. 3. Влияние погрешности определения расхода топлива на результаты диагностики

Расход		Погрешности измерения расхода топлива				
		(+0,2 %)	(+0,4 %)	(+0,6 %)	(+0, 8%)	(+1,0 %)
$V^m_{под}$	абс. значение	0,634	0,608	0,583	0,557	0,532
	отн. погрешность	-4	-8	-13	-18	-24
$V^e_{под}$	абс. значение	1,36	1,36	1,36	1,359	1,359
	отн. погрешность	0	0	0	0.07	0.07
$V^{O_2}_{ок}$	абс. значение	0,187	0,182	0,177	0,172	0,168
	отн. погрешность	-2	-5	-7	-11	-13

Табл. 4. Влияние погрешности определения расхода воздуха и повышения температуры воздуха в рекуператоре на результаты диагностики

Расход		Погрешности измерения исходных величин				
		(+0,2 %)	(+0,4 %)	(+0,6 %)	(+0,8 %)	(+1,0 %)
$V^m_{под}$	абс. значение	0,686	0,713	0,74	0,767	0,794
	отн. погрешность	3	7	10	13	16
$V^e_{под}$	абс. значение	1,363	1,366	1,369	1,372	1,375
	отн. погрешность	0,2	0,4	0,7	0,9	1
$V^{O_2}_{ок}$	абс. значение	0,197	0,202	0,207	0,212	0,217
	отн. погрешность	3	5	7	9	11

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

Погрешность определения $V_в$ или ($t_в^{вых}$–$t_в^{вх}$) оказывает особо значительное влияние на текущее значение подсоса воздуха в топку и текущий расход кислорода на окисление металла, а на участке газохода от пламенного окна до рекуператора наблюдаются незначительные изменения. При этом знаки погрешности определения величин-аргументов и всех искомых величин совпадают.

Выводы

Исследована параметрическая чувствительность системы диагностики окалинообразования металла в печи, базирующейся на обратном методе решения. Установлены закономерности влияния погрешности определения таких величин-аргументов как концентрации кислорода в районе пламенного окна и рекуператора, расход топлива, расход воздуха, повышение температуры воздуха на следующие искомые величины: расход воздуха, подсасываемого в топку; расход воздуха, подсасываемого на участке газохода от пламенного окна до рекуператора; расход кислорода на окисление металла. Полученные результаты важны для выбора классов точности приборов, измеряющих значения входных величин, при которых будут получены приемлемые погрешности определения искомых величин. Для измерений концентрации кислорода приемлемыми можно считать погрешности до 5 %. При измерении расходов топлива и воздуха целесообразно работать с погрешностями не более 0,5 %.

Список литературы

1. Raudenský, M. Impact of oxide scale on heat treatment of steels / M. Raudenský, M. Chabičovský, J. Hrabovský // May 21st-23rd International conference on metallurgy and materials 2014, Brno, Czech Republic, EU: materials conf. – Brno, 2014. – P. 240-247.
2. Cao, G.M. Morphology of oxide scale and oxidation kinetics of low carbon steel / G.M. Cao [et al.] // ISU International. – 2014. – Vol.21. – P. 335-341.
3. Takeda, M. Oxidation behavior and scale properties on the Si containing steels / M. Takeda, T. Onishi // Mater. Sci. Forum. August 15, 2006, Zurich, Switzerland. – 2006. – Vol.522. – P. 477-488.
4. Garnaud, G. Thickness of the oxide layers formed during the oxidation of iron / G. Garnaud, R.A. Rapp // Oxid. Met. – 1977. – Vol.11. – P.193-198.
5. Диагностика процесса окисления металла в пламенных печах / А.Б. Бирюков, Е.В. Новикова, Т.Г. Олешкевич и др. // Металлургические печи. – 2014. – Вып.6(21). – С. 3-11.
6. Suarez, L. High-temperature oxidation of Fe-Si alloys in the temperature range 900-1250 °C / L.Suarez, J.Schneider, Y.Houbaert // July 4st-7rd, 2007 Defect. Diffus. Forum. Algarve, Portugal. – 2008. – Vol.273-276. – P.661-666.
7. Мастрюков, Б.С. Теплофизика металлургических процессов / Б.С. Мастрюков, Г.С. Сборщиков. – М.: Металлургия, 1996. – 268 с.
8. Современные подходы к диагностике процессов тепловой обработки металла в печах / А.Б. Бирюков, С.М. Сафьянц, А.А. Иванова и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2015. – №1. – С. 50-55.
9. Математическое моделирование процессов тепловой обработки металла в печах с учетом окалинообразования / А.Б. Бирюков, С.И. Гинкул, П.А. Гнитиев и др. // Сталь. – 2016. – №8. – С. 85-90.
10. Диагностика процесса образования окалины при высокотемпературном нагреве стальной заготовки / А.Б. Бирюков, Ю.Л. Курбатов, Е.В. Новикова и др. // Черная металлургия. – 2017. – №11(1415). – С. 65-72.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, I.K. Kolba
Donetsk National Technical University (Donetsk)

EVALUATION OF PARAMETRIC SENSITIVITY OF THE METAL OXIDATION DIAGNOSTICS SYSTEM

Background. *Various diagnostics systems can be used to quickly predict the loss of metal with scale during its heat treatment in the furnace. A diagnostics system is known based on the inverse method, the advantages of which are simplicity and rather low requirements for the power of computing resources. The objective of this paper is to study the parametric sensitivity of this diagnostic system.*
Materials and/or methods. *The research method consists in the fact that for each of the input values of the diagnostics system, numerical experiments carried out alternately with artificially introduced standard errors (the values of the other arguments remain at the basic level). The results of the ob-*

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

tained values compared with their basic values, and on this basis, a judgment made about the influence of the error of an argument on the results of the diagnostics system.
Results. *Investigated the influence on the metal oxidation of such arguments as the oxygen concentration in the combustion products in the area of the frame window and in the area of the recuperator, fuel consumption, air consumption, the rise of the air temperature in the recuperator to the desired values: consumption of the air sucked into the furnace, consumption of the air sucked into the gas flue in the area from the flame window to the recuperator, the oxygen consumption.*
Conclusion. *The results obtained are important for the selection of accuracy classes of devices that measure input values, at which acceptable errors in determining the desired values obtained. Errors of up to 5 % can be considered acceptable for oxygen concentration measurements. When measuring fuel and air consumption, it is advisable to work with errors of not more than 0.5 %.*

Keywords: *metal heating, scaling, metal loss, diagnostics system, measurement error.*

Сведения об авторах

А.Б. Бирюков
SPIN-код: 3186-0680
Author ID: 7006918782
ORCID iD: 0000-0002-8146-2017
Телефон: +380 (50) 260-97-75
Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

И.К. Кольба
Телефон: +380 (71) 349-42-91
Эл. почта: irishka_kolba@mail.ru

Статья поступила 28.09.2018 г.
© А.Б. Бирюков, И.К. Кольба, 2018
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько



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

УДК 669.162.21.001.573

Ю.Е. Рубан
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ФУРМЕННОЙ ЗОНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПРИ ПОДАЧЕ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

На основе исследований, проведенных в работе, разработана методика расчета теплотехнических процессов в фурменной зоне доменной печи при подаче пылеугольного топлива (ПУТ). В случае использования ПУТ как дополнительного топлива степень важности определения излучающего теплового потока значительно возросла. Предложенная методика позволяет определить численные значения тепловых потоков в фурменной зоне, передаваемых посредством конвекции и излучения, и делает возможным их сравнение.

Ключевые слова: *доменная печь, фурма, кокс, дутье, пылеугольное топливо, теплообмен, конвекция, излучение.*

Постановка проблемы

Одним из решений проблемы снижения расхода дорогостоящего кокса в доменном производстве является использование заменителей кокса (мазут, природный газ, пылеугольное топливо). Разработка методики расчета теплообменных процессов в фурменной зоне доменной печи с условием подачи заменителей кокса и анализ этих процессов является необходимым условием повышения эффективности эксплуатации доменных печей.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ литературных источников показал, что исследования излучения в фурменной зоне доменной печи проводились на теоретическом уровне, используя полученные экспериментальные данные в области теории горения факела. Наиболее сложной для определения является степень черноты, так как через фурменную зону проходят жидкие чугун и шлак, происходит горение пылеугольного топлива, кокса, природного газа, циркуляция кокса [1…3].

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка методики расчета теплообменных процессов в фурменной зоне доменной печи при подаче пылеугольного топлива и их анализ.

Основной материал исследования

Особенности теплообменных и газодинамических процессов в доменной печи состоят в том, что они происходят в условиях неопределенных или приблизительно определяемых размеров кускового материала, объема фурменных зон и многих других величин. Практическое отсутствие излучающих трехатомных газов (CO_2 и H_2O) в горновых газах делают преобладающим конвективный теплообмен между газами и материалами шихты и продуктов плавки. Но при использовании пылеугольного топлива, подаваемого как заменитель кокса вместе с дутьем, теплообмен излучением значительно интенсифицируется. В потоке высокотурбулизированных газов в результате образуются газообразные продукты сгорания и частички расплавленной золы. В этом случае фурменная зона представляет собой сильно запыленный объем с высокой излучательной способностью.

В нижней части доменной печи (горне) осуществляются процессы сжигания топлива, которые приводят к выделению теплоты и восстановительных газов (оксид углерода и водород) [4]. Потоки дутья поддерживают вблизи фурменных зон хаотическое движение, участниками которого становятся все продукты горения от крупных кусков кокса до наименьших частичек пыли. Постоянно двигаясь, они сталкиваются, меняя скорости и направление движения. Происходит передача тепла конвекцией.

Для оценки теплового потока, передаваемого посредством конвективного теплообмена, используем закон Ньютона-Рихмана [5,6]:

$$q_к=\alpha_к\cdot(T_ф-T_{пр}),\ Вт/м^2, \qquad (1)$$

где $\alpha_к$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией, $Вт/(м^2\cdot К)$; $T_ф$ – температура газов в фурменной зоне, К; $T_{пр}$ – температура продуктов доменной плавки и кокса, окружающих фурменную зону, К.

Дошедшие до уровня фурм раскаленные куски кокса и расплавленная шихта заполняют весь

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

объем горна, и лишь вблизи фурм образуются зоны, заполненные газовой средой, поступающей в горн с помощью фурменных приборов. Здесь образуются очаги горения вносимого с дутьем пылеугольного топлива и догорание уже раскаленного, загоревшегося кокса. Шихтовые материалы различных размеров собираются вокруг фурм. Они находятся в состоянии активной подвижности под воздействием дутья. Большая часть кусковых материалов, участвующих в горении у фурм, имеет мелкий и средний размер. Крупные куски кокса, располагающиеся вокруг активной струи, также находятся в движении, но скорость их движения сравнительно меньше. Такое разнообразие происходящих здесь процессов приводит к образованию каплевидных зон горения. Несимметричная овальная форма несколько неудобна для моделирования. Если принять форму зоны теплообмена в форме сферической полости, рассмотреть и рассчитать происходящие при горении процессы будет проще (рис. 1).

Исходя из рис. 1, можно заметить неравномерное распределение вовлекающегося в фурменную зону кокса под действием потока фурменных газов. Следовательно, можно сделать вывод о неравномерном распределении скоростей, а также теплообмене в целом. В фурменной зоне наблюдаются зоны с различной интенсивностью теплообмена. Принимая во внимание все факторы, влияющие на процесс образования теплоты в этом объеме, включая как участников горения, так и их физические свойства, удалось создать модель, которая демонстрирует расположение исследуемых зон теплообмена (рис. 2).

Поток частиц дополнительного топлива и дутья движется к середине фурменной зоны с шириной, равной диаметру фурменного прибора, постепенно расширяясь до диаметра струи прямого потока, сформировавшегося к середине всей зоны. Струя расширяется незначительно, но диаметр ее увеличивается, что видно из рис. 2. На этом участке истечение происходит еще под давлением дутья, но необходимо заметить, что вокруг струи создается препятствие, располагающееся в виде рециркулирующего обратного потока. В центре фурменной зоны образуется среда, представляющая собой смесь дутья, пылеугольного топлива, а также вовлекшихся раскаленных кусков кокса. Эта среда, получившая прибавление в скорости от потока рециркуляции, расширяясь теперь беспрепятственно, ударяется о слой малоподвижных и более объемных кусков кокса, которые образуют такую область вокруг зон горения у каждой из фурм и заполняют все пространство горна. Здесь образуется еще одна, очень важная в теплообмене, так называемая зона интенсивной конвекции (место удара струи), имеющая площадь $f_{инт}$ и коэффициент теплоотдачи $\alpha_{инт}$. Большая роль данного участка в образовании зоны рециркуляции и обратного потока объясняется тем, что движущаяся оттолкнувшаяся среда резко меняет направление и совершает движение, противоположное движению прямого дутьевого потока. Хаотичность раскаленных частиц, кружащих в газовом объеме, приводит к их сгоранию.

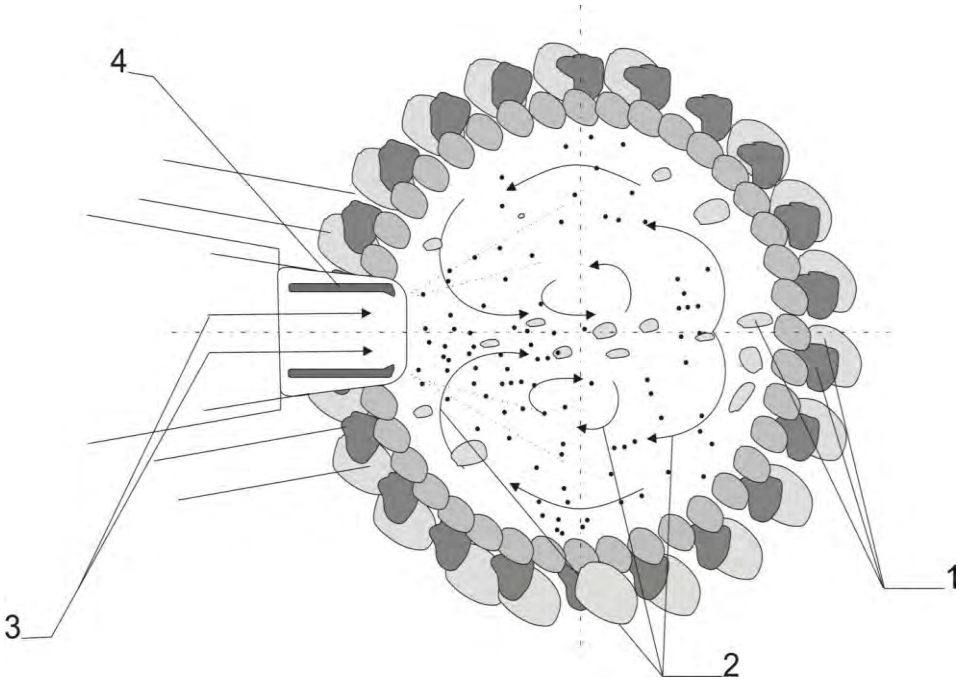


Рис. 1. Модель фурменной зоны, вид сверху:
1 – кокс; *2* – ПУТ; *3* – дутье; *4* – фурма

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

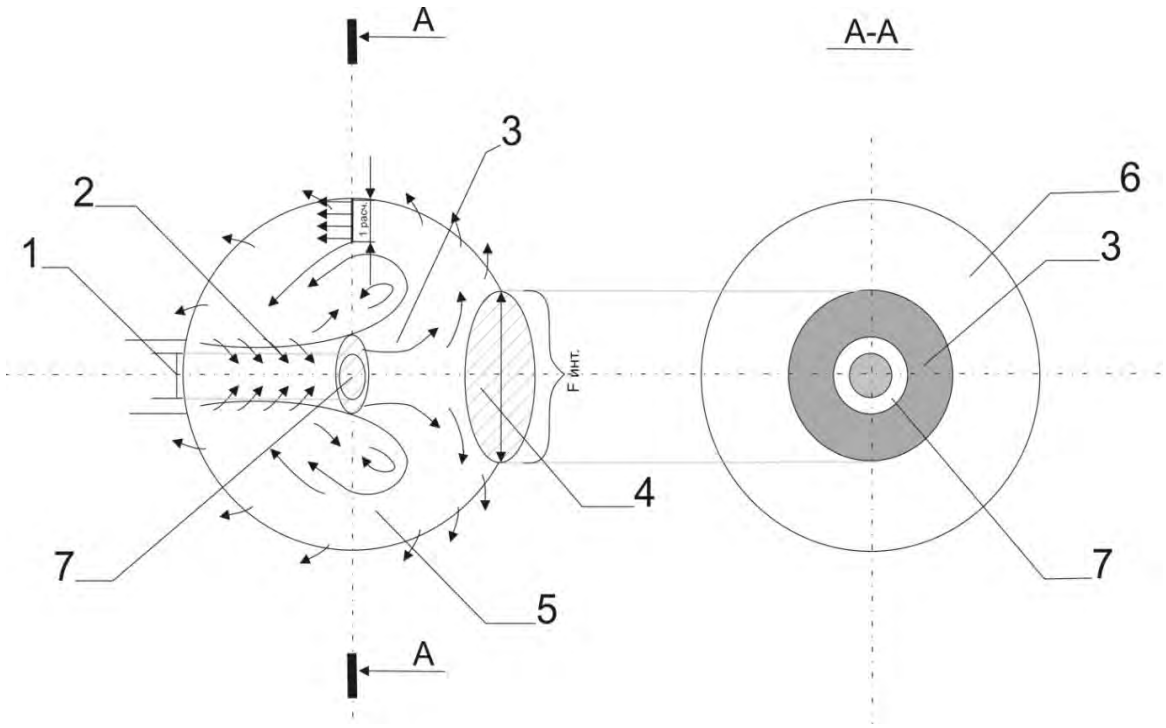


Рис. 2. Зоны теплообмена в фурменной зоне:
1 – фурма; *2* – прямой дутьевой поток; *3* – зона рециркуляции потока;
4 – зона интенсивной конвекции; *5* – обратный поток; *6* – сечение для прохода газов;
7 – сечение струи прямого потока

Так, непрерывно подающийся поток дутья и ПУТ, постепенно вовлекающийся в фурменную зону, и куски кокса участвуют в процессе горения. Конвективный теплообмен в этой области проходит особо активно. Коэффициенты теплоотдачи образовавшихся в фурменном процессе зон имеют различное значение, также как зоны составляют разное соотношение площадей по отношению ко всей площади фурменной зоны.

Коэффициенты теплоотдачи конвекцией в этих зонах находятся из критерия Нуссельта [7]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \qquad (2)$$

который, в свою очередь, определяется из критериальной зависимости [8]:

$$Nu = \varphi \cdot 0{,}037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}, \qquad (3)$$

где *Re* – критерий Рейнольдса [9]:

$$Re = \frac{w \cdot d}{v}, \qquad (4)$$

Pr – критерий Прандтля [7]:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \qquad (5)$$

В формулах (2)-(5): φ – коэффициент, учитывающий влияние угла, под которым происходит встреча струи и обратного потока с поверхностью фурменной зоны (табличное значение) [7]; *w* – скорость дутья, распределенного по поверхности фурменной зоны, м/с; *d* – расчетный линейный размер для зоны интенсивного конвективного теплообмена, принимаем равным диаметру сечения данной зоны $d_{инт.}$, м; *v* – коэффициент кинематической вязкости фурменных газов, м^2/с; *a* – коэффициент температуропроводности, м^2/с; λ – коэффициент теплопроводности фурменных газов, Вт/(м·К)).

Скорость дутья, распределенного по поверхности фурменной зоны (сферы):

$$w = \frac{V_{д.1}}{F_{сф}}, \text{ м/с},$$

где $V_{д.1}$ – расход дутья на одну фурму, м^3/с; $F_{сф}$ – площадь поверхности фурменной зоны (сферы), м^2.

Расход дутья на одну фурму:

$$V_{д.1} = \frac{V_д}{n}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где $V_д$ – расход дутья в доменной печи, м^3/ч; *n* – количество фурм, шт.

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

Расход дутья в доменной печи [10]:

$$V_д = V \cdot G_{чуг},\ м^3/ч,$$

где V – расход дутья, м^3/т чугуна; $G_{чуг}$ – производительность печи, т/ч.

Площадь поверхности фурменной зоны (сферы):

$$F_{сф} = \pi \cdot D^2,\ м^2.$$

Исходя из результатов исследований [10], принимаем диаметр фурменной зоны $D \approx 1$м. Диаметры для зон интенсивного теплообмена и обратного потока можно определить как характеристики свободных турбулентных потоков по формулам Г.Н. Абрамовича. Диаметр потока на расстоянии полусферы [9]:

$$\frac{d_{стр}}{d_0} = 0{,}517\frac{l}{d_0} + 1,$$

где $d_0 = d_{фурмы} = 0{,}14$ м – диаметр фурмы; $l = 0{,}5$ м – расстояние полусферы.

Соответственно:

$$r_{стр} = \frac{d_{стр}}{2},\ м.$$

Таким образом, расчетный линейный размер рассчитываем как половину разницы радиуса фурменной зоны и радиуса струи в середине фурменной зоны $r_{стр}$, принимаем в формулах для определения критерия Рейнольдса и Нуссельта для обратного потока:

$$l = \frac{r_{сф} - r_{стр}}{2},\ м,$$

(деление величины на 2 учитывает вихрь рециркуляции).

Диаметр потока на расстоянии длины фурменной зоны будет являться диаметром зоны интенсивного конвективного теплообмена. Площадь сечения зоны интенсивного теплообмена равна:

$$F_{инт} = \frac{\pi - D^2}{4},\ м^2.$$

Площадь сечения обратного потока:

$$F_{обр} = \frac{\pi}{4 \cdot (D_{сф}^2 - D_{инт}^2)},\ м^2.$$

Скорость на участке интенсивного теплообмена (на расстоянии l=1 м) по формуле Г.Н. Абрамовича [9]:

$$\frac{w_m}{w} = 0{,}96 \cdot \left(0{,}152 \cdot \frac{l}{d_0} + 0{,}29\right)^{-1},\ м/с.$$

Средний коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_{ср} = \left(1 - \frac{F_{инт}}{F_{сф}}\right) \cdot \alpha_{к(обр)} + \left(\frac{F_{инт}}{F_{сф}}\right) \cdot \alpha_{к(инт)},\ Вт/(м^2 \cdot К).$$

Пример расчета плотности конвективного теплового потока приведен для фурменной зоны с расходом дутья $V_{д.(1)}$=1,881 м^3/с, температурой дутья $t_{дутья}$=1000 ºС, $d_{ф.з.}$=1м, d_0=0,14 м. В исследовании определено, что площадь интенсивного теплообмена равна 12 % от общей поверхности фурменной зоны.

В случае максимально возможного расхода ПУТ, равного 250 кг/т чугуна, в работе получены следующие величины: $\alpha_{инт}$=111 Вт/(м^2·К), $\alpha_{обр}$=29 Вт/(м^2·К); средний коэффициент теплоотдачи равен $\alpha_{ср}$=0,12·111+0,88·29=35,2 Вт/(м^2·К). Плотность теплового потока (1) для $t_ф$=2000 ºС и $t_{пр}$=1500 ºС, составила величину $q_к$=17600 Вт/м^2.

Для расчета теплового потока, передаваемого излучением в фурменной зоне, воспользуемся законом Стефана – Больцмана [8]:

$$q_{изл} = c_{пр} \cdot \left[\left(\frac{T_ф}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{пр}}{100}\right)^4\right],\ Вт/м^2, \quad (6)$$

где приведенный коэффициент излучения $c_{пр} = \varepsilon_{ф.з.} \cdot c_0$, Вт/(м^2·К^4), приведенная степень черноты объема фурменной зоны определяется по формуле [10,11]:

$$\varepsilon_{ф.з.} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_г} + \frac{1}{\varepsilon_{поверх}} - 1},$$

где $\varepsilon_г$ – степень черноты объема фурменной зоны; $\varepsilon_{поверх}$ – степень черноты внутренней поверхности фурменной зоны.

Степень черноты объема фурменной зоны определяется с учетом известного положения закона Кирхгофа о том, что степень черноты, характеризующая интенсивность излучения ε, равна поглощающей способности тела «а». В

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

связи с тем, что горение кокса и ПУТ в фурменной зоне происходит с образованием двухатомных газов (CO, H_2), которые, как известно, практически не участвуют в радиационном теплообмене, излучать тепло могут только плотные частицы. В объеме фурменной зоны происходит практически мгновенное сгорание частиц ПУТ, в результате чего образуется запыленный поток. Поглощательная способность запыленного потока может быть определена по методике Кутателадзе-Боришанского [11]:

$$\varepsilon_г = a = 1 - e^{-Kl},$$

где K – эффективное значение коэффициента ослабления лучей в данной среде; l – длина пути луча, м.

Эффективное значение коэффициента ослабления лучей в данной среде [11]:

$$K = K_n \cdot \mu \cdot F_{уд},$$

где K_n – эффективный коэффициент ослабления, доли ед.; μ – плотность запыленного газового потока, F – средняя удельная поверхность пыли, м^2/г,

$$K_n = 0{,}42 \cdot \left(\frac{A}{\rho}\right) \cdot 273 \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{T_n^2 \cdot d^2}},$$

где d – средний диаметр золы, мкм; ρ – плотность горючих веществ, кг/м^3;

$$\mu = \frac{A^c \cdot G}{V_{гг}},$$

где A^c – содержание золы в используемом топливе, доли ед.; G – расход топлива, кг/т чугуна; $V_{гг}$ – выход горновых газов, м^3/т чугуна.

Средняя удельная поверхность частицы, м^2/г [11]:

$$F_{уд} = \frac{F}{V \cdot \rho} = \frac{0{,}187}{R \cdot \rho},$$

где R – радиус частицы (ПУТ или кокса).

Длина луча равна [11]:

$$l = 0{,}60 \cdot D,$$

где D – диаметр фурменной зоны, $D \approx 1$м.

Проанализировав зависимость степени черноты газового потока от размера частицы и расхода ПУТ, мы увидели, что степень черноты объема достигает единицы уже при достаточно малой подаче ПУТ и любом размере частицы.

Степень черноты поверхности фурменной зоны рассчитывается как средневзвешенная (по чугуну, шлаку и коксу) величина и составляет 0,47…0,51 [11]:

$$\varepsilon_{пов} = \frac{\varepsilon_{чуг} \cdot G_{чуг} + \varepsilon_{шлак} \cdot G_{шлак} + \varepsilon_{кокс} \cdot G_{кокс}}{G_{чуг} + G_{шлак} + G_{кокс}},$$

где $\varepsilon_{чуг}$, $\varepsilon_{шлак}$, $\varepsilon_{кокс}$ – степени черноты, соответственно, чугуна, шлака и кокса [7]; $G_{чуг}$, $G_{шлак}$, $G_{кокс}$ – расходы чугуна, шлака и кокса, кг/т чугуна [9].

Приведенная степень черноты с применением ПУТ составляет величину практически равную $\varepsilon_{поверх}$. Для $t_ф$=2000 ºС и $t_{пр}$=1500 ºС плотность теплового потока q (6), передаваемого излучением в фурменной зоне, при использовании ПУТ достигает 450000 Вт/м^2, что доказывает важность его определения.

Выводы

На основе исследований, проведенных в работе, разработана методика определения тепловых потоков в фурменной зоне, передаваемых посредством конвекции и излучения. Предложенная методика позволяет определить численные значения тепловых потоков и делает возможным их сравнение. Для режима с максимальной подачей ПУТ 250 кг/т чугуна установлены значения конвективного и лучистого тепловых потоков продуктов плавки, которые составляют соответственно 17,6 кВт/м^2 и 450 кВт/м^2. Таким образом, в случае использования ПУТ как дополнительного топлива степень важности определения излучающего теплового потока значительно возрастает.

Список литературы

1. Влияние пылеугольного топлива на степень черноты фурменной зоны и тепловой режим горна доменной печи / С.Л. Ярошевский, Ю.Л. Курбатов, И.В. Мишин и др. // Металлург. – 2013. – №4. – С. 48-53.
2. Ishii, K. Advanced pulverized coal injection technology and blast furnace operation. – Hokkaido: Pergamon, 2000. – 324 p.
3. Определение траектории потока газа при вдувании в доменную печь пылеугольного топлива / В.П. Лялюк [и др.] // Сталь. – 2017. – №4. – С. 2-4.
4. Trinks, W. Indusnrial furnases / W. Trinks,

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

M.H. Mawhinney. – New-York; London: John Wiley & Sons inc., 2003. – 496 p.
5. Теплообмен: теория и практика: учебник для высших образовательных учреждений / В.В. Карнаух [и др.]. – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2018. – 328 с.
6. Ginkul, S.I. Heat and Mass Transfer / S.I. Ginkul, V.V. Kravtsov, A.B. Birukov. – Donetsk: Nord-Press, 2006. – 291 p.
7. Казанцев, Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е.И. Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
8. Курбатов, Ю.Л. Металлургические печи: учебное пособие / Ю.Л. Курбатов, А.Б. Бирюков, Ю.Е. Рубан. – Донецк: ГОУ ВПО «ДонНТУ», 2016. – 433 с.
9. Гидрогазодинамика в теплотехнике / Ю.Л. Курбатов [и др.]. – Донецк: Норд-Пресс, 2009. – 234 с.
10. Мишин, И.В. Методика расчета температуры продуктов плавки на выпуске при вдувании в горн дополнительных топлив / И.В. Мишин, Ю.Л. Курбатов, С.Л. Ярошевский // Труды Международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии». Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 18-21 сентября 2012 г. – 7 с.
11. Кутателадзе, С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – М.: Гос. энергетическое издательство, 1959. – 414 с.

Yu.E. Ruban
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE METHOD FOR CALCULATING THERMAL PROCESSES IN THE TUYERE ZONE OF THE BLAST FURNACE WITH THE PULVERIZED COAL FEED

Background. *One of the solutions to the problem of reducing the consumption of expensive coke in blast furnace production is the use of coke substitutes (fuel oil, natural gas, pulverized coal). Development of a method for calculating heat exchange processes in the tuyere zone of the blast furnace with the supply of coke substitutes and analysis of these processes is a necessary condition for improving the efficiency of blast furnaces operation.*
Materials and/or methods. *The developed technique based on the determination of the numerical values of heat fluxes in the tuyere zone transferred by convection and radiation. In the tuyere zone, there is almost instantaneous combustion of pulverized coal particles, resulting in a dusty stream, the absorption capacity of which determined by the method of Kutateladze-Borishansky.*
Results. *The proposed method allows determining the numerical values of heat fluxes and makes it possible to compare them. For the mode with a maximum supply of pulverized coal – 250 kg/t of pig iron, the values of convective and radiant heat fluxes of the smelting products set, which are respectively17.6 kW/m^2 and 450 kW/m^2.*
Conclusion. *On the basis of research, a method developed for determining the heat flux in the tuyere zone transferred by convection and radiation. In the case of using pulverized coal as an additional fuel, the importance of determining the radiant heat flux increases significantly.*

Keywords: *blast furnace, tuyere, coke, blast, pulverized coal, heat exchange, convection, radiation.*

Сведения об авторе
Ю.Е. Рубан
SPIN-код: 4225-4029
ORCID iD: 0000-0001-8496-4824
Телефон: +380 (71) 303-45-02
Эл. почта: k-j-e@yandex.ru

Статья поступила 30.10.2018 г.
© Ю.Е. Рубан, 2018
Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров

УДК 669.046

А.А. Троянский /д.т.н./, В.И. Заика /к.т.н./, В.Л. Жук /к.т.н./, С.Н. Ратиев
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ОСОБЕННОСТИ ВАКУУМНОГО РАСКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

В заводских условиях проведены опытно-промышленные исследования по проведению вакуум-углеродного раскисления полупродукта в камерном вакууматоре без продувки кислородом с последующим его доведением до необходимого состава на установке ковш-печь. В результате проведенной работы определены показатели качественного контроля проката, которые свидетельствуют о нецелесообразности данной схемы производства ни по экономическим, ни по качественным параметрам металла, в отличие от принятой схемы выплавки стали в дуговой печи и дальнейшей ее обработки на установке ковш-печь.

Ключевые слова: *дуговая сталеплавильная печь, установка ковш-печь, вакуум-углеродное раскисление, качество металла, обезуглероживание.*

Постановка проблемы

Наличие на металлургических предприятиях разнообразных устройств и методов внепечной обработки предполагает их оптимальное сочетание в технологической линии производства различных марок сталей для получения требуемого качества металла.

В этой связи сотрудниками одного из металлургических предприятий Донбасса и ДонНТУ выполнены опытно-промышленные исследования по анализу эффективности вакуум-углеродного раскисления стали для ее обезуглероживания. Этот способ широко распространен в металлургии и позволяет снижать в металле содержание углерода, газов и неметаллических включений при сравнительно небольших капитальных затратах.

Однако вакуумирование нераскисленной и полураскисленной стали не гарантирует получение низкого содержания газов в готовой продукции, поскольку после окончания вакуумной обработки проводится нагрев металла, его раскисление и легирование, науглероживание, десульфурация [1,2].

Анализ последних исследований и публикаций

Как показывает анализ научных работ, посвященных данной теме [3,4], большое внимание уделяется интенсивности кипения ванны для создания необходимых кинетических условий протекания реакции взаимодействия углерода с кислородом, выделения растворенного водорода и азота. С наличием в раскисленной стали поверхностно-активных веществ, последняя практически не подвергается обезуглероживанию, в то время как вакуумирование нераскисленной и частично раскисленной стали позволяет наиболее полно реализовать преимущества углерода как раскислителя [5,6].

Цель (задачи) исследования

Задачей настоящей работы является анализ следующих показателей сталей, полученных по разным технологическим схемам: содержание углерода и газов; загрязненность металла неметаллическими включениями и их балл; механические свойства – с целью выявления их экономической целесообразности, а также оценки качества металла.

Основной материал исследования

В технологической схеме производства были задействованы: дуговая печь переменного тока ДСП 120 с эркерным выпуском металла и системой продувки расплава инертным газом (ДСП); установка внепечной обработки ковш-печь (УКП); установка камерного вакуумирования с системой продувки аргоном (процесс VD). Выплавляли стали 20 и 45, которые разливали на сортовой радиальной МНЛЗ с защитой струи металла от вторичного окисления на пути от сталь-ковша до кристаллизатора.

Выплавку, внепечную обработку и разливку осуществляли в соответствии с заводскими технологическими инструкциями.

Основная технологическая схема производства стали на предприятии предусматривает выплавку полупродукта в ДСП, доводку его до конечного химического состава на УКП (схема ДСП-УКП) и разливку на сортовой МНЛЗ. Для ряда марок сталей, с целью дополнительного рафинирования, в технологическую схему на заключительной стадии внепечной обработки

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

включают вакуумирование (схема ДСП-УКП-VD). Обе эти схемы рассматривали как сравнительные.

Учитывая возможное расширение сортамента производимой на заводе стали, в частности с пониженным содержанием углерода, рассмотрели целесообразность применения для этих целей технологической схемы ДСП-VD-УКП (опытная схема). По каждой технологической схеме выплавляли не менее 5 плавок.

Перед выпуском металла из ДСП производили по два последовательных замера активности кислорода в металле и определяли среднее ее значение. Во время выпуска металла в ковш присаживали вторичный алюминий из расчета 1 кг на каждые 10^{-3} % превышения активности кислорода содержанием более 0,04 % и ферромарганец – из расчета получения среднего его содержания в марке стали, а также 100 кг извести.

Ковши с металлом опытных плавок перед обработкой на УКП передавали на вакууматор. Затем в полупродукт при необходимости присаживали углеродсодержащий материал из расчета получения в нем содержания углерода не менее 0,10 %, с учетом остаточного углерода и углерода, вносимого ферромарганцем. В процессе вакуумирования расплав перемешивали аргоном с суммарным расходом его от 500 до 700 нл/мин, после замера активности кислорода металл передавали на УКП, где сталь подогревали и раскисляли, корректировали и усредняли ее температуру и химический состав, а также рафинировали и модифицировали.

Установили, что проведение вакуум-углеродного раскисления железоуглеродистого полупродукта для стали 20 и стали 45 перед его доводкой на установке ковш-печь позволяет снизить содержание углерода в нем на 0,03…0,04 %.

Выплавка и внепечная обработка металла по всем рассматриваемым технологическим схемам обеспечивает довольно низкое содержание газов в прокате (табл. 1). Однако содержание их в металле опытных плавок выше, чем в серийном: водорода – на 30…40 %, азота – на 10…12 %, кислорода – на 30…35 %. Связано это, вероятно, с нагревом металла электрическими дугами и окончательными операциями доводки металла до конечного состава в УКП.

Качество макроструктуры металла (табл. 2) опытных и сравнительных плавок находится примерно на одном уровне.

Загрязненность проката опытных плавок (по среднему баллу в соответствии с ГОСТ 1778 метод Ш6) строчечными оксидами и хрупкими силикатами на 0,4…0,6 балла выше, чем проката сравнительных плавок. Загрязненность же сульфидами опытных плавок ниже на 0,3 балла, чем в прокате сравнительных плавок (табл. 3).

Табл. 1. Содержание газов в готовом прокате опытных и сравнительных плавок сталей 20 и 45*

Марка стали	Технология	Массовая доля газов в прокате, % · 10^{-4}		
		H_2	N_2	O_2
20	ДСП-VD-ПК	1,42	0,010	0,38
20	ДСП-ПК-VD	0,85	0,008	0,29
20	ДСП-ПК	0,95	0,009	0,32
45	ДСП-VD-ПК	1,70	0,015	0,18
45	ДСП-ПК-VD	1,00	0,012	0,12
45	ДСП-ПК	1,10	0,013	0,15

Примечание: * – в таблице приведены средние значения по пяти плавкам каждой технологической схемы.

Табл. 2. Результаты макроконтроля проката опытных и сравнительных плавок сталей 20 и 45*

Марка стали	Технология	Оценка макроструктуры, балл			
		центральная пористость	точечная неоднородность	ликвационный квадрат	подкорковые пузыри
20	ДСП-VD-ПК	0,62	1,04	0,45	0
20	ДСП-ПК-VD	0,67	1,00	0,50	0
20	ДСП-ПК	0,65	1,00	0,52	0
45	ДСП-VD-ПК	0,00	1,00	1,50	0
45	ДСП-ПК-VD	0,30	1,14	1,42	0
45	ДСП-ПК	0,00	1,00	1,45	0

Примечание: * – в аблице приведены средние значения по пяти плавкам каждой технологической схемы.

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

Табл. 3. Загрязненность проката опытных и сравнительных плавок неметаллическими включениями (НВ)*

Варианты выплавки	Оценка загрязненности НВ	Загрязненность проката неметаллическими включениями в соответствии с ТУ 14-1-1529-93, балл				
		сульфиды	оксиды строчечные	оксиды точечные	силикаты хрупкие	силикаты пластиные
Норма (средний балл)		не более				
		3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Норма (максим. балл)		не более				
		4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Сталь 20						
ДСП-VD-ПК	максим.	2,0	4,0	0	4,0	0
	средний	1,8	2,6	0	3,2	0
ДСП-ПК-VD	максим.	2,5	2,3	0	3,7	0
	средний	2,1	2,0	0	2,7	0
ДСП-ПК	максим.	2,8	2,5	0	3,8	0
	средний	2,4	2,1	0	2,9	0
Сталь 45						
ДСП-VD-ПК	максим.	2,5	3,0	0	3,2	0
	средний	2,0	2,1	0	2,1	0
ДСП-ПК-VD	максим.	2,7	2,0	0	2,5	0
	средний	2,4	1,6	0	1,8	0
ДСП-ПК	максим.	4,0	0,5	0	1,3	0
	средний	3,4	0,5	0	0,5	0

Примечание: * – в таблице приведены средние значения по пяти плавкам каждой технологической схемы.

Табл. 4. Результаты механических испытаний проката опытных и сравнительных плавок*

Варианты выплавки	$\sigma_в$, Н/мм^2	$\sigma_{0,2}$, Н/мм^2	δ, %	φ, %
Норма для стали 20 по ТУ 14-1-1529-93	410-550	267	24	45
ДСП-VD-ПК	501,6	335	30,7	61,7
ДСП-ПК-VD	500,0	331,7	29,3	62,0
ДСП-ПК	502,0	332,5	30,0	61,5
Норма для стали 45 по ТУ 14-1-1529-93	600	355	16	40
ДСП-VD-ПК	680,0	425,0	23,5	49,0
ДСП-ПК-VD	672,6	428,8	22,5	48,2
ДСП-ПК	682,0	110,0	20,0	47,0

Примечание: * – в таблице приведены средние значения механических свойств по пяти плавкам каждой технологической схемы.

Механические свойства опытного и сравнительного металла (табл. 4) находятся приблизительно на одном уровне и по абсолютной величине удовлетворяют нормативным требованиям.

Выводы

Выполненные на предприятии опытно-промышленные исследования свидетельствуют, что камерное вакуумирование в технологической цепочке ДСП-VD-УКП целесообразно в основном при производстве стали с низким содержанием углерода.

Выплавка же конструкционных сталей по трехэтапной схеме в условиях данного предприятия себя не оправдывает ни по экономическим, ни по качественным параметрам.

Список литературы

1. Коновалов, Ю.В. Металлургия: учебное пособие: в 3 кн. К.1. Производство чугуна, железа, стали и ферросплавов / Ю.В. Коновалов, А.А. Троянский, С.Н. Тимошенко. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2011. – 431 с.
2. Рощин, В.Е. Электрометаллургия и металлургия стали: учебник / В.Е. Рощин, А.В. Рощин. – Челябинск: Издательский центр

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

ЮУрГУ, 2013. – 572 с.
3. Тулуевский, Ю.Н. Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора: монография / Ю.Н. Тулуевский, И.Ю. Зинуров. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 347 с.
4. Senberger, J. Contribution to Deoxidation of Austenitic Steels in a Vacuum Induction Furnace with Carbon // Archives of foundry engineering. – 2015. – Vol.15. – P. 105-109.
5. Tetsuya Watanabe. Deoxidation of Stainless Steel by Carbon in Laboratory-Scale Vacuum Induction Melting // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1970. – №7. – P. 144.
6. Kloppers, C. Primary de-oxidation of Basic Oxygen Furnace steel by means of carbon / C. Kloppers, T. Fedotova // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. – 2001. – P. 321-328.

A.A. Troyansky /Dr. Sci. (Eng.)/, V.I. Zaika /Cand. Sci. (Eng.)/,
V.L.Zhuk /Cand. Sci. (Eng.)/, S.N. Ratiev
Donetsk National Technical University (Donetsk)

FEATURES OF THE CARBON STEEL VACUUM DEOXIDATION

Background. *One of Donbass metallurgical plants needed steel smelting with very low content of carbon and impurities affecting the quality of the metal. In this regard, pilot studies conducted on vacuum-carbon deoxidation of the semi-product obtained in an AC arc furnace, which allowed meeting the specified requirements.*
Materials and/or methods. *The material for the study was steel 20 and 45, for which a semi-product smelted in an arc furnace with subsequent refining of the metal to the required composition and the required quality at the ladle-furnace unit and further steel casting on the varietal CCM. Since the non-oxidized and semi-oxidized metal subjected to the optimal deoxidation and decarburization, along with this scheme of steel production, after melting the semi-product subjected to vacuum-carbon deoxidation on a vacuum installation of a chamber type without oxygen blowing (experimental scheme). In addition, vacuuming of metal carried out after its out-of-furnace treatment on the ladle-furnace unit.*
Results. *Found that the vacuum-carbon deoxidation of the semi-product can reduce its carbon content by 0.03…0.04 %, reduce the content of gases and non-metallic inclusions to the required level. At the same time, their content in the experimental metal is higher than in the serial one*: *hydrogen – by 30…40 %, nitrogen – by 10…12 %, oxygen – by 30…35 %, which is apparently caused by the heating of the metal by electric arcs and the operations of metal finishing to the final composition on the ladle-furnace unit.*
Conclusion. *The studies carried out at the enterprise shown that chamber heating is advisable in the production of steel with low carbon conten since the smelting of other steel grades does not justify itself either economically or in quality.*

Keywords: *arc steel furnace, ladle-furnace unit, vacuum-carbon deoxidation, metal quality, decarburization.*

Сведения об авторах

А.А. Троянский
SPIN-код: 5708-7912
Телефон: +380 (71) 301-98-60
Эл. почта: taa@donntu.org

В.Л. Жук
Телефон: +380 (71) 363-74-69
Эл. почта: emkaf@fmf.donntu.org

В.И. Заика
Телефон: +380 (71) 420-29-67
Эл. почта: v.i.zaika@list.ru

С.Н. Ратиев
SPIN-код: 7771-8866
Телефон: +380 (71) 387-35-97
Эл. почта: rsn@donntu.org

Статья поступила 18.12.2018 г.
© А.А. Троянский, В.И. Заика, В.Л. Жук, С.Н. Ратиев, 2018
Рецензент д.т.н., проф. А.Б. Бирюков

УДК 662.7:552.57

Л.Ф. Бутузова /д.х.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк),
ГУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко» (Донецк)
В.Н. Шевкопляс /к.х.н./
ГУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко» (Донецк)
В.А. Колбаса, Г.Н. Бутузов /к.х.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ МОЛОДЫХ УГЛЕЙ ПРИ ПОЛУКОКСОВАНИИ И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЬ С ОБРАЗОВАНИЕМ ПАРАМАГНИТНЫХ ЦЕНТРОВ

Подробно изучены структурные преобразования органической массы углей в температурном интервале полукоксования. Установлено, что накопление парамагнитных центров (ПМЦ) при пиролизе молодых углей преимущественно связано с образованием радикалов феноксильного и углеводородного типов в результате деструкции эфирных групп, реакций декарбоксилирования, деалкилирования и изменения надмолекулярной организации твердых остатков.

Ключевые слова: *уголь, полукоксование, парамагнитные центры, функциональные группы, ИК-спектроскопия, рентгеноструктурный анализ.*

Постановка проблемы

В основе большинства методов переработки углей лежат процессы пиролиза их органической массы. Результаты многочисленных исследований позволяют утверждать, что эти процессы протекают с участием свободных радикалов. Однако сведения о природе радикалов и в целом о природе парамагнетизма углей противоречивы и зачастую не имеют строгих доказательств.

Анализ последних исследований и публикаций

По данным, полученным методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), при термообработке углеродистых материалов концентрация парамагнитных центров увеличивается, достигает максимального значения при температуре 500 °С и обращается в ноль при температуре более 2000 °С [1].

Авторы работы [2] показали, что угли (82…88 % С), шихты на их основе и карбонизаты, полученные при температуре до 1000 °С, обладают парамагнетизмом. Предполагают, что необходимыми условиями образования ПМЦ в соединениях с системой сопряженных связей являются: наличие низколежащих возбужденных состояний в полисопряженных системах и ассоциирование молекул, способствующее стабилизации парамагнитного центра в матрице высокомолекулярного вещества.

Исходя из общих представлений о возможных источниках накопления ПМЦ в углях (разрыв химических связей, образование комплексов с переносом заряда, наличие ионов переходных металлов), можно предположить, что при термической деструкции образуются, прежде всего, радикалы аморфной области структуры угля, неспаренный электрон которых локализован у периферийных атомов.

Авторы работы [3] при нагревании углей зафиксировали два максимума накопления парамагнитных центров (ПМЦ) – при 200…250 °С и 550…650 °С. В работе Черепанова Е.С. и др. [4] обнаружили максимум ПМЦ при 250…380 °С. Дж. Шмидт и Д.В. Ван Кревелен, при исследовании процесса пиролиза витринитов в вакууме, обнаружили рост концентрации ПМЦ, начиная с 200 °С, и достижение максимального количества ПМЦ при 500…600 °С [5].

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является комплексное изучение изменений структурно-группового состава, надмолекулярной организации и парамагнитных характеристик молодых углей в температурном интервале полукоксования для получения конкретной информации о природе ПМЦ, образующихся при нагревании.

Основной материал исследования

В качестве объекта исследования использовали Канско-Ачинский бурый уголь (C^{daf} – 72,5; H^{daf} – 4,8; O^{daf} – 19,6; N^{daf} – 0,9; S^{daf} – 0,2; W^{a} – 13,1; A^{d} – 7,9; V^{daf} – 45,2 %), который представляет собой ценное сырье для нетопливного использования, и каменный уголь марки Д (C^{daf} –

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

78,4; H^{daf} – 4,95; S^{d}_{t} – 1,05; A^{d} – 1,6; V^{daf} – 37,3 %).

Ступенчатое нагревание серии проб угля проводили в дериватографе Q-1500D при скорости 10 °С/мин в инертной среде до различных температур. Термообработанные образцы охлаждали сразу же после достижения заданной температуры в потоке инертного газа с последующим определением функционального состава, парамагнитных, ИК-спектральных и рентгеноструктурных характеристик. Определение концентрации карбонильных, фенольных и карбоксильных групп проводили с использованием ускоренных методов химического функционального анализа [6].

Запись ЭПР спектров образцов и эталона проводили на радиоспектрометре РЭ-1306 в 3-сантиметровом диапазоне длин волн при комнатной температуре на воздухе, кроме данных, приведенных в табл. 1, которые получены в условиях вакуума.

Регистрацию дифрактограмм проводили на дифрактометре «Дрон-2.0» с использованием рентгеновской трубки с медным антикатодом; излучение отфильтровывалось никелевым фильтром; напряжение на трубке – 28 кВт; анодный ток – 15 мА; коллимационная система щелей: щели Соллера 1-4, 2-1, 3-0,5; скорость диаграммной ленты – 720 мм/сек; скорость счетчика – 1 град/мин; предел измерений – 1000 имп./сек. Порошки твердых топлив запрессовывали в бериллиевую кювету 10×20 мм. Относительная ошибка определения параметра d_{002} составляет ±0,3 %, для L_c ±1 % и для L_a ±5 %. Анализ рентгенограмм проводили по методу Дебая-Шеррера.

d_{002} – расстояние между углеродными сетками вычисляли при n=1 и длине волны CuK_α излучения, равной 0,154 нм, d_{002} ±0,01 Å, по уравнению:

$$2d \sin\theta = n\lambda, \qquad (1)$$

где d – период повторяемости в структуре или межплоскостное расстояние, нм; θ – угол падения рентгеновского луча (угол Брэгга), град; n – порядок отражения кристаллической решетки (целое число); λ – длина волны рентгеновского излучения, нм.

L_c – толщина пакета углеродных сеток (нм), определялась по формуле Шеррера, L_c ±1 Å:

$$L_c = \frac{0{,}9 \cdot \lambda}{B_{002} \cdot \cos\theta_{002}}, \qquad (2)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения, нм; B_{002} – угловая полуширина максимума (002), град; θ_{002} – величина максимума (002), град.

L_a – продольный размер структурных элементов (нм), определялся по формуле Уоррена:

$$L_a = \frac{1{,}84 \cdot \lambda}{B_{10} \cdot \cos\theta_{10}}, \qquad (3)$$

где B_{10} – полуширина максимума (10), град; θ_{10} – величина максимума (10), град.

Число слоев в пакете, равное (L_c/d_{002}+1).

ИК-спектры углей и твердых продуктов пиролиза регистрировали на спектрометре Bruker FTS-7 с использованием техники DRIFT. Угли для анализа готовили в форме 5 %-ных смесей с бромидом калия. ИК-спектры образцов снимали в области волновых чисел γ=4000…400 $см^{-1}$. Коррекцию базовой линии проводили с использованием компьютерной программы Origin.

Как видно из рис. 1, концентрация парамагнитных центров при пиролизе исследуемого бурого угля увеличивается в температурном интервале 300…420 °С и снижается при более высокой температуре.

Авторы работы [7] при нагревании углей зафиксировали дополнительно два низкотемпературных максимума количества парамагнитных центров – при 150 °С и 250…380 °С.

Чтобы объяснить появление первого максимума, авторам представилось интересным разделить влияние двух факторов: термического и окислительного воздействия. С этой целью проанализировано изменение концентрации ПМЦ длиннопламенного угля в температурном интервале 30…150 °С на воздухе и в вакууме. Исследуемый образец выдерживали в резонаторе спектрометра при определенной температуре с изотермической выдержкой в течение 30 мин.

Как видно из табл. 1, накопление ПМЦ при нагревании до 150 °С однозначно может быть отнесено за счет реакций окисления органической массы угля (ОМУ).

Табл. 1. Изменение концентрации ПМЦ в зависимости от температуры термической или термоокислительной деструкции

Температура, °С	$N \cdot 10^{-18}$, $г^{-1}$	
	Термическая деструкция в условиях вакуума	Термоокислительная деструкция
25	10,98	10,9
70	10,98	11,0
110	10,90	12,5
120	10,31	-
150	9,60	12,0

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

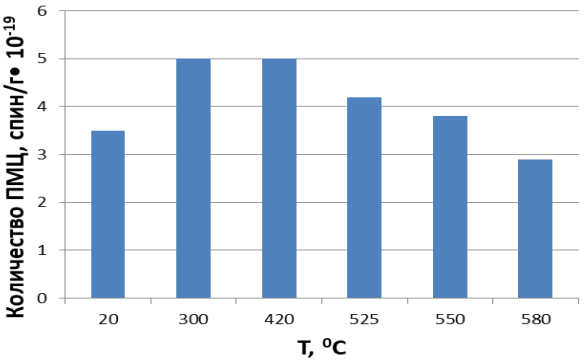


Рис. 1. Изменение концентрации ПМЦ в угле после его нагревания до различных температур в инертной среде

На рис. 1 показана температурная зависимость изменения концентрации ПМЦ в исследуемом буром угле после его нагревания до различных температур в инертной среде. Как видно из рисунка, концентрация ПМЦ достигает максимального значения при 300…420 °С и снижается при более высокой температуре.

В табл. 2 представлены данные исследования каменного угля марки Д методом электронного парамагнитного резонанса. Как видно из таблицы, число парамагнитных центров значительно увеличивается в процессе термической деструкции. Рассматриваемые сигналы асимметричны со степенью асимметрии (отношение амплитуды положительной части производной поглощения к отрицательной), зависящей от температуры пиролиза угля. Значения *g*-фактора для полукокса близки к значению для типичных ароматических π-радикалов, таких как анион-радикалы антрацена, фенантрена и др.

Величина *g*-фактора исходных бурого и длиннопламенного углей превышает 2,0035, что указывает на локализацию неспаренных электронов на кислороде, т.е. на образование кислородсодержащих радикалов. Сужение ЭПР сигнала полукокса и его Лоренцова форма свидетельствуют об усилении обменных электронных взаимодействий в системе.

Максимум при 250…380 °С в литературе объясняют присутствием так называемых центров локальной активации в системах с сопряженными связями, а максимум при 500…600 °С связывают с появлением свободных радикалов, возникающих при пиролизе.

Для более детального объяснения природы этого явления, с нашей точки зрения, необходимо рассмотреть изменение концентрации кислородсодержащих функциональных групп (КФГ), которые определяют химию процессов низкотемпературной деструкции.

Из рис. 2 видно, что при низких температурах (20…300 °С) наблюдается накопление фенольных гидроксилов и карбонилов, которое в отсутствие кислорода можно объяснить только результатом разрыва меж- и внутримолекулярных, прежде всего, водородных связей в ассоциатах, образованных с участием кислородсодержащих функциональных групп, и освобождением дополнительного количества гидроксильных и карбонильных групп, которые не определяются методами химического функционального анализа в исходном угле. Следовательно, на этой стадии уже происходят деструктивные процессы, связанные с накоплением и расходованием КФГ.

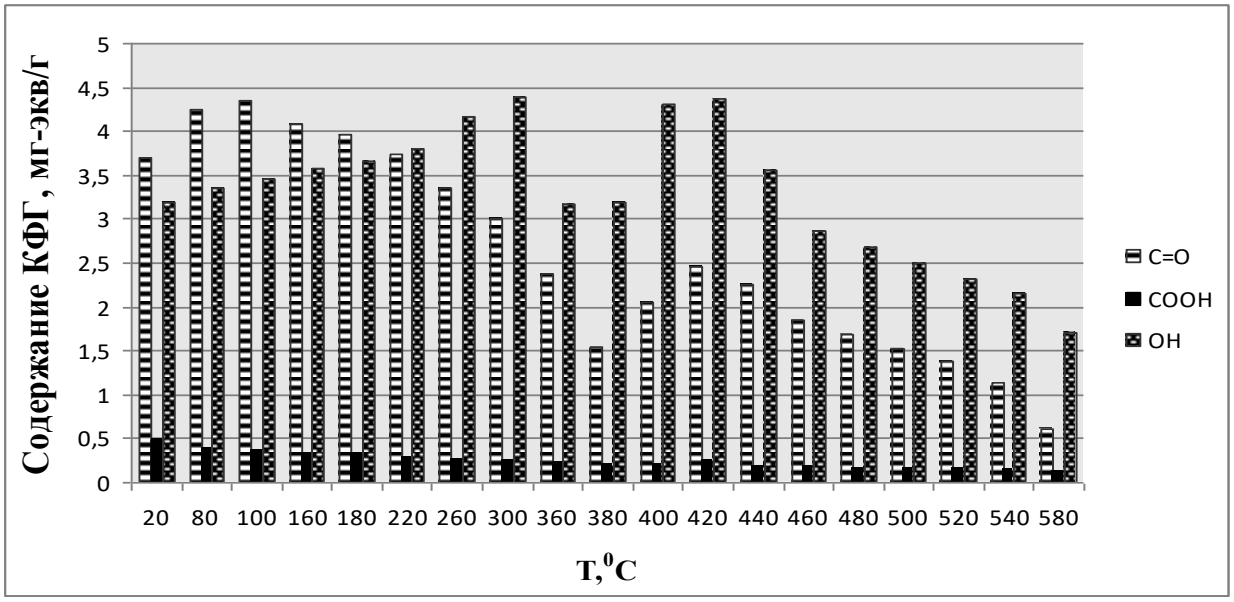


Рис. 2. Изменение концентрации активных кислородсодержащих функциональных групп в буром угле после его нагревания до различных температур в инертной среде

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

Табл. 2. Результаты ЭПР-исследований длиннопламенного угля

Шахта,пласт, марка	Тип угля	Условия обработки	N, спин/г×10^{-19}	Ширина линии	Асиммет-рия, А/В	Форма линии	*g*-фактор
Трудовская, l_4, Д	*а*	20 °С	0,6	6,4	0,97	Л/Г	2,004
«-»	*а*	520 °С	3,5	5,6	1,01	Л	2,003

Резкое увеличение скорости образования ПМЦ происходит одновременно с интенсивным разрушением КФГ в органической массе угля при температуре выше 300 °С. По мнению Ж.А. Давыдовой, образование ПМЦ в процессе термической деструкции бурого угля при температуре 400 °С происходит в результате термического разложения свободных кислых групп [8].

Однако данные, приведенные на рис. 2, показывают, что концентрация карбоксильных групп на порядок меньше концентрации фенольных групп. Если сопоставить количество образующихся ПМЦ и разрушившихся карбоксильных групп в температурном интервале 300…420 °С, то оказывается, что из 250-СООН групп только одна приводит к образованию карбоксилат-радикалов. Эти данные позволяют предположить преимущественное участие в процессе радикалов феноксильного типа.

На рис. 3 приведены температурные зависимости изменения относительных интенсивностей полос поглощения, характерных для следующих функциональных групп: гидроксилов, связанных водородной связью (3200 $см^{-1}$); $C_{ар}$-Н (3050 $см^{-1}$); алифатических СН, CH_2 и CH_3 групп (2920 $см^{-1}$); CH_3 групп (2950); С=О групп в альдегидах, кетонах и кислотах (1700 $см^{-1}$); С-О-С, С-О-(1260 $см^{-1}$).

Как видно из рисунка, интенсивности полос поглощения кислородсодержащих (ОН и С-О-О) и алифатических (CH_{al}) групп по отношению к ароматическим (С=С) также свидетельствуют об экстремальном изменении концентрации алифатических и КФГ при нагревании, т.е. метод ИК-спектроскопии подтверждает данные химического функционального анализа. При этом увеличение интенсивности полос КФГ в точках экстремумов совпадает с уменьшением интенсивности полос поглощения эфирных групп. Этот факт свидетельствует об образовании активных групп при термодеструкции бурого угля преимущественно в результате разрушения эфирных мостиков. К примеру, резкому увеличению количества ОН групп при 420 °С соответствует такое же резкое снижение концентрации эфиров. Следовательно, образование фенолов в период основного разложения в инертной среде происходит преимущественно в результате расщепления связей эфирного типа.

Эти результаты являются косвенным доказательством того, что в данный период происходят процессы, аналогичные термолизу бензилариловых эфиров.

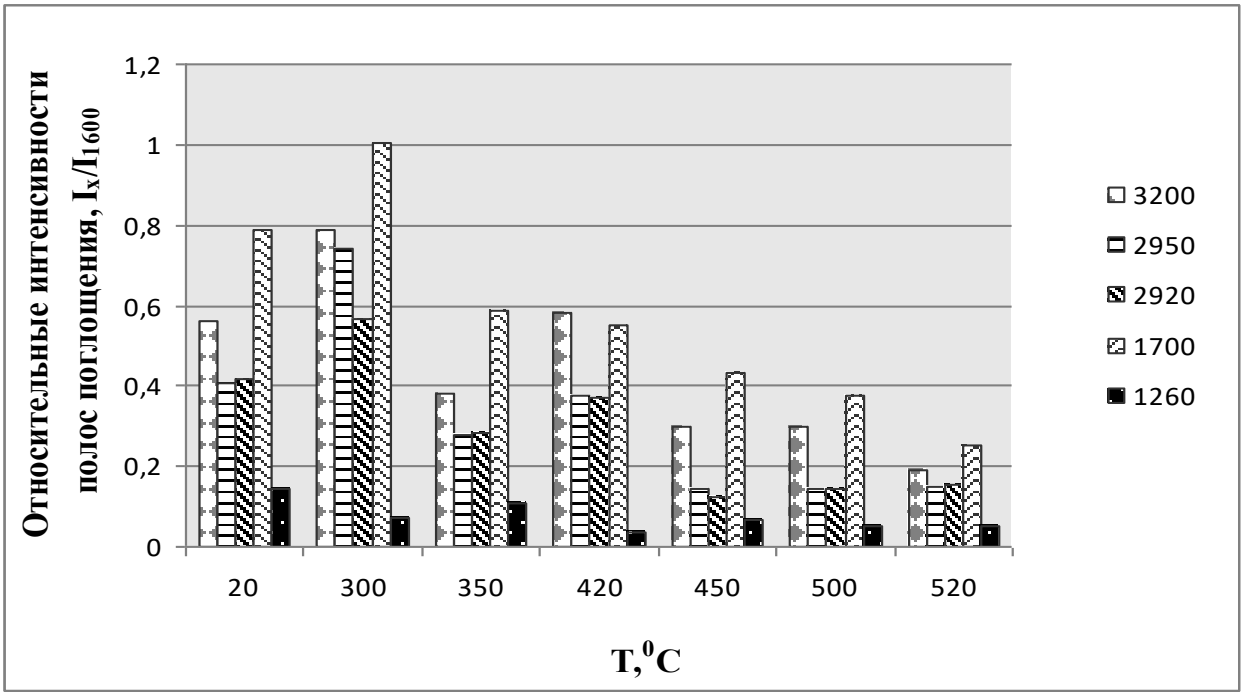
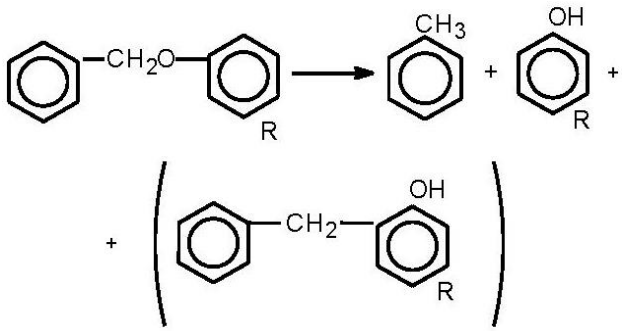


Рис. 3. Данные DRIFT-спектроскопии пиролизованного бурого угля

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



В целом в температурном интервале полукоксования осуществляются как реакции декарбоксилирования, так и реакции деалкилирования, что позволяет предположить образование радикалов феноксильного (ароксильного) и углеводородного типов.

Изменение отношения интенсивностей полос поглощения 1700/2920 и 3050/2920 $см^{-1}$ свидетельствует об увеличении прочности межмолекулярных взаимодействий и относительного содержания ароматических СН групп к алифатическим СН группам при температуре выше 420 °С. Увеличение отношений I_{2950}/I_{2920} при 300 и 450 °С указывает на увеличение доли коротких алифатических цепей в этот период (рис. 4).

Аналогичная картина наблюдается при полукоксовании малометаморфизованного каменного угля. В полукоксе увеличивается относительное содержание $С_{ар}$-Н групп по отношению к $С_{ал}$-Н группам, что характеризуется отношением I_{3050}/I_{2920} (табл. 3); относительное содержание CH_3 групп в общем количестве $С_{ал.}$-Н групп также имеет тенденцию к увеличению, т.е. происходит процесс ароматизации, а алифатические цепи становятся короче. Кроме того, полукоксы характеризуются большей прочностью межмолекулярных взаимодействий (I_{1700}/I_{2920}) по сравнению с исходными углями.

Методом рентгеноструктурного анализа была изучена надмолекулярная организация образцов (рис. 5). На стадии наиболее интенсивного разложения (420 °С) происходит разрушение пакетов, состоящих из взаимно упорядоченных углеродных сеток. Об этом свидетельствует увеличение расстояния между сетками (d_{002}), уменьшение протяженности сеток (L_a), уменьшение интегральной интенсивности максимума 002 с S_{002}=0,292 до S_{002}=0,199. Число слоев в пакете изменяется от трех в исходном угле до двух, соответственно уменьшается толщина пакета (L_c), размер сетки S_{002}. Следствием вышеуказанных процессов является разрыхление и частичное разрушение пакетов, состоящих из взаимно упорядоченных углеродных сеток. Подтверждением этого факта является также минимальное значение параметра I_{1700}/I_{2920}, который характеризует прочность межмолекулярных взаимодействий. Разрушение последних приводит к ослаблению влияния системы полисопряжения на алифатические и кислородсодержащие фрагменты структуры угля и резкому увеличению скорости выделения продуктов полукоксования (оксидов углерода и углеводородов) в результате реакций декарбоксилирования и деалкилирования [9].

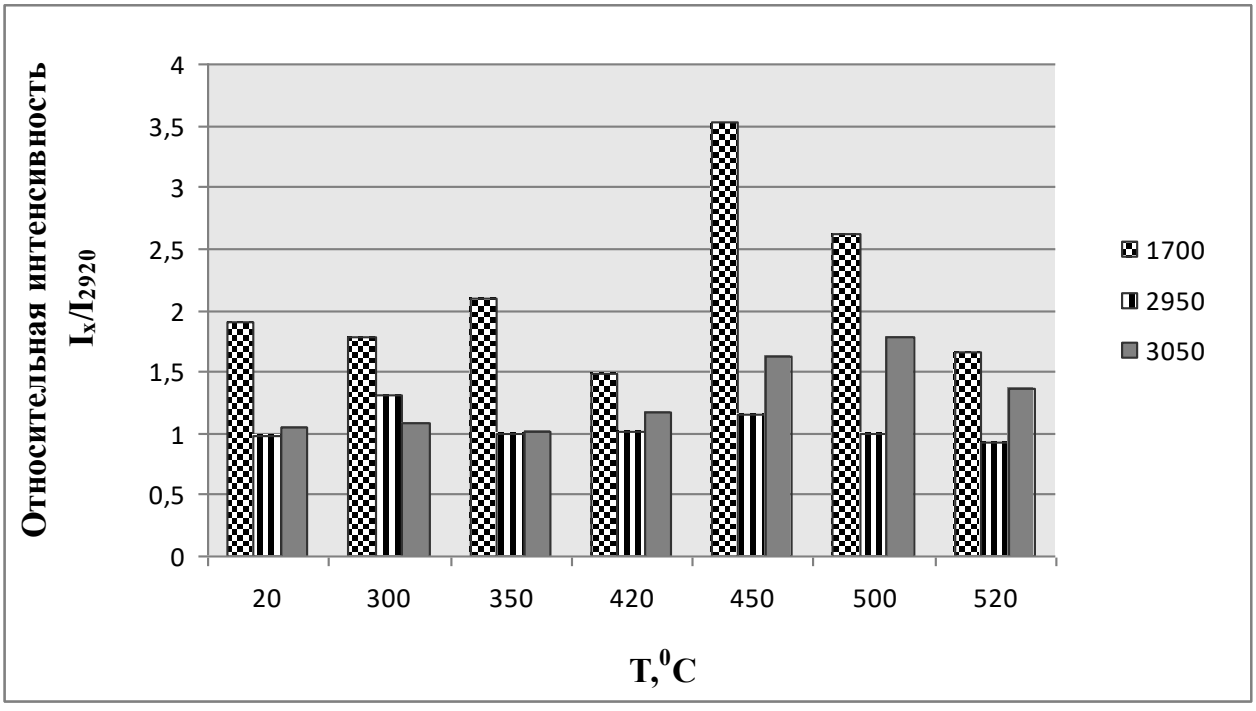


Рис. 4. Данные DRIFT-спектроскопии пиролизованного бурого угля

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

Табл. 3. Данные ИК-спектроскопии длиннопламенного угля

Шахта, пласт, марка	Тип угля	Химическая обработка	Относительная интенсивность I_x/I_{2920}			Относительная площадь S_x/S_{1600}	
			1700 2920	2970 2920	3050 2920	$S_{1100\text{-}1000}$	$S_{900\text{-}700}$
Трудовская, l_4, Д	*а*	20 °С	0,78	1,00	0,92	0,10	0,49
«-»	*а*	520 °С	0,97	1,01	1,07	0,22	4,87

По мере увеличения температуры пиролиза от 420 °С до 550 °С рентгеноструктурные параметры изменяются в противоположном направлении, т.е. происходят процессы сшивки и взаимного упорядочивания углеродных сеток, которое приводит к увеличению числа слоев в пакете до трех и увеличению протяженности пакета. При этом снижается общее количество упорядоченной алифатики с S_γ=0,038 до S_γ=0,024, и она становится менее однородной (4γ-полосы).

Процессы сшивки и взаимного упорядочивания углеродных сеток приводят к рекомбинации неспаренных электронов и уменьшению их концентрации в твердом остатке, уменьшается количество алифатических СН групп, увеличивается содержание не замещенных ароматических СН групп, что свидетельствует об увеличении степени конденсированности структуры ОМУ.

Аналогичные изменения происходят при полукоксовании каменного угля низкой стадии метаморфизма, с той лишь особенностью, что процессы сшивки в угле марки Д выражены значительнее: размеры пакета заметно увеличиваются, число слоев в пакете достигает 5 при практически неизменном расстоянии между углеродными сетками.

Таким образом, полученные данные показывают, что наиболее существенные структурные преобразования бурого угля происходят при 420 °С. Как раз при этой температуре зарегистрировано максимальное количество ПМЦ в твердых остатках, минимальные размеры пакетов углеродных сеток и минимальная прочность межмолекулярных взаимодействий, а также максимумы на температурных кривых изменения содержания КФГ (см. рис. 2, 3). Следовательно, можно предположить, что накопление кислородсодержащих соединений в этот период связано с разрывом химических связей в пакетах, а именно в эфирных мостиках, соединяющих ароматические фрагменты.

Взаимообусловленность превращений, приводящих к накоплению и расходованию фенолов, алифатических групп (I_{2920}/I_{1600}) и ПМЦ, позволяет предположить об участии в процессе радикалов ароксильного и углеводородного типа.

Аналогичные процессы происходят при полукоксовании каменного угля низкой стадии метаморфизма.

Полученные результаты согласуются с данными статьи [10], в которой предложено 10 возможных путей пиролиза фенетил-фенилового эфира (моделирует структуру лигнина), рис. 6.

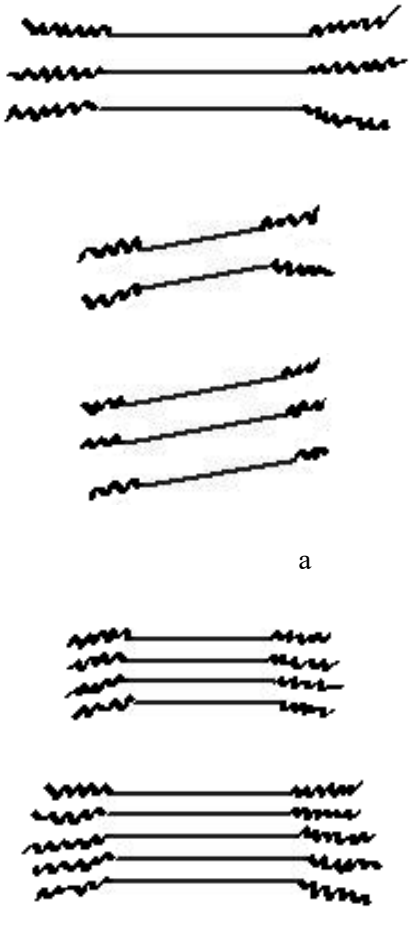


Рис. 5. Влияние температуры на размеры кристаллита твердых остатков пиролиза бурого и каменного углей:
а – Канско-Ачинский бурый уголь;
б – каменный уголь марки Д

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

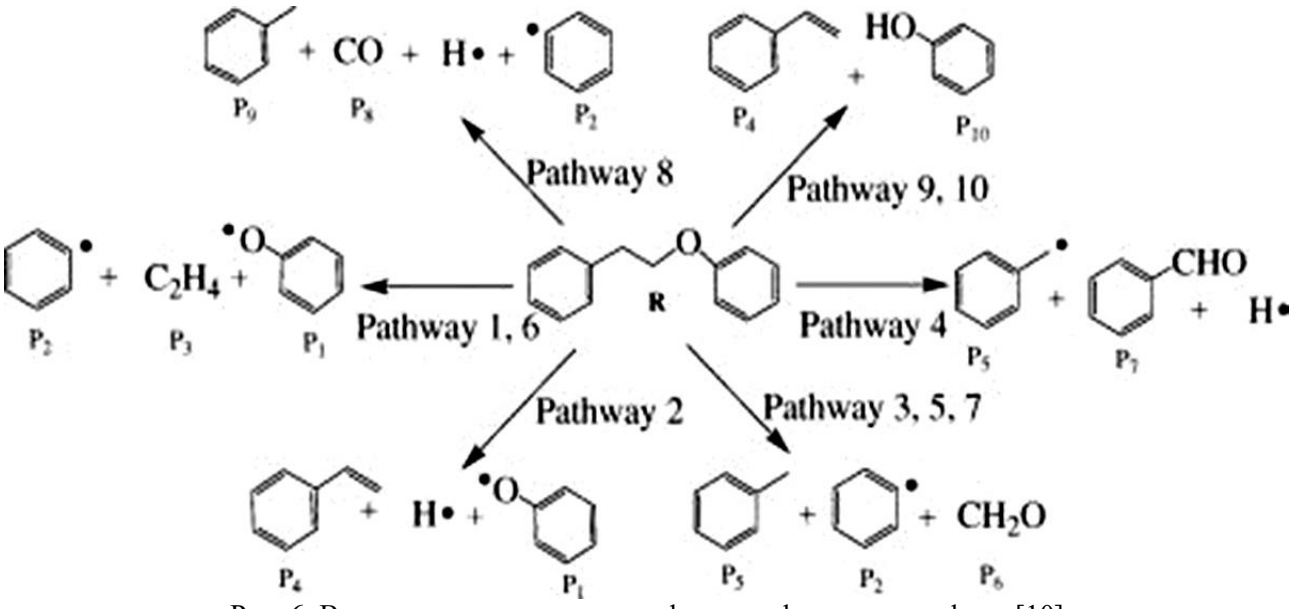


Рис. 6. Возможные пути пиролиза фенетил-фенилового эфира [10]

Как видно из рисунка, механизм, предложенный на основании термодинамического и кинетического анализа реакций пиролиза вышеуказанного эфира, также включает стадии образования радикалов ароксильного и углеводородного типов.

Выводы

Методами химического функционального, рентгеноструктурного анализа, ЭПР, ИК-спектроскопии показано, что накопление ПМЦ при пиролизе молодых углей в температурном интервале полукоксования связано с образованием радикалов феноксильного и углеводородного типов, образующихся в результате реакций декарбоксилирования, деалкилирования, деструкции эфирных мостиков, соединяющих ароматические фрагменты, разрыхления и частичного разрушения пакетов, состоящих из взаимно упорядоченных углеродных сеток. Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами, полученными при пиролизе индивидуальных органических эфиров, и свидетельствуют о ведущей роли реакций накопления и расходования эфирных групп в процессе полукоксования молодых углей.

Список литературы

1. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справочник под ред. В.П. Соседова. – М.: Металлургия, 1975. – 335 с.
2. Piawa, B. Application of electron paramagnetic resonance spectroscopy to examination of carbonized coal blends / B. Piawa [et al.] // International Journal of Coal Geology. – 2009. – No.77. – P. 372-376.
3. О природе сигналов ЭПР в углях различной степени метаморфизма / Ю.Б. Тютюнников и др. // Химия твердого топлива. – 1968. – №4. – С.133.
4. Влияние ионов кальция и железа на спектры дисперсии ЭПР Ирша-Бородинского угля / Е.С.Черепанова и др. // Химия твердого топлива. – 1985. – №6. – С. 20.
5. Smidt, J. Number of free radicals in coal during carbonization at different heating Rates / J. Smidt, D.W. Van Krevelen // Fuel. – 1959. – No.3. – Vol.38. – P. 355.
6. Кучер, Р.В. Структура ископаемых углей и их способность к окислению / Р.В. Кучер, В.А. Компанец, Л.Ф. Бутузова. – К.: Наук. думка, 1980. – 166 с.
7. Макаров, Г.Н. Изучение термохимических превращений углей методом электронного парамагнитного резонанса / Г.Н. Макаров, А.П. Бронштейн, Б.В. Саннинский // Кокс и химия. – 1971. – №9. – С.1.
8. Давыдова, Ж.А. Образование ПМЦ при термической и термоокислительной деструкции бурого угля и их реакционная способность: автореф. дис. … канд. хим. наук: 02.00.03 / Давыдова Жанетта Алексеевна. – Москва, 1980. – 26 с.
9. Influence of oxygen-containing groups of soft coal in pyrolysis / L.F. Butuzova [et al.] // Fuel. – 1994. – No.6. – Vol.73. – P. 945-949.
10. Theory studies on pyrolysis mechanism of phenethyl phenyl ether / Xiaolu Huang, Chao Liu, Jinbao Huang, [et al.] // Computational and Theoretical Chemistry. – 2011. – Iss.1-3. – Vol.976. – P. 51-59.

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

L.F. Butuzova /Dr. Sci. (Chem.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk),
Litvinenko Research Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry (Donetsk)
V.N. Shevkoplyas /Cand. Sci. (Chem.)/
Litvinenko Research Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry (Donetsk)
V.A. Kolbasa, G.N. Butuzov /Cand. Sci. (Chem.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE STRUCTURAL TRANSFORMATION OF YOUNG COALS AT SEMI-COKING AND THEIR RELATIONSHIP WITH THE FORMATION OF PARAMAGNETIC CENTERS

Background. *The information available in the literature about the nature of radicals and on the whole the nature of the paramagnetism of coals is contradictory and often not strongly proved. The aim of this paper is a comprehensive study of changes in the structural group composition, supramolecular organization, and paramagnetic characteristics of young coals in the temperature range of semi-coking to obtain specific information about the nature of paramagnetic centers (PMC) formed during heating.*
Materials and/or methods. *Kansk-Achinsk brown coal and coal grade D of the Donetsk basin with high oxygen content used as objects of research.*
Results. *The paper analyzes the change in the PMC concentration of the studied coals in the temperature range of semi-coking. In parallel, the changes in the structural group composition of carbonates obtained at different temperatures studied by the methods of functional chemical analysis, DRIFT-spectroscopy and x-ray, and structural analysis.*
Conclusion. *The obtained results show that the accumulation of PMCs during pyrolysis of young coals in the temperature range of semi-coking primarily associated with the formation of the radicals of phenoxyl and hydrocarbon types formed as a result of decarboxylation, dealkylation, destruction of ether bridges connecting aromatic fragments, loosening and partial destruction of packages consisting of mutually ordered carbon grids. The experimental data are consistent with the results obtained by pyrolysis of individual organic esters.*

Keywords: *coal, pyrolysis, structure, correlation coefficient, hydrogen disproportion.*

Сведения об авторах

Л.Ф. Бутузова
SPIN-код: 7391-2663
Author ID: 7004736806
ORCID iD: 0000-0002-4232-3057
Телефон: +380 (50) 921-38-51
Эл. почта: ludmila.lfb@yandex.ru

Г.Н. Бутузов
SPIN-код: 4448-4394
Author ID: 8701390000
Телефон: +380 (50) 589-74-89
Эл. почта: ludmila.lfb@yandex.ru

В.А. Колбаса
SPIN-код: 4466-7867
Телефон: +380 (95) 059-55-32
Эл. почта: vikula.ka@mail.ru

В.Н. Шевкопляс
Author ID: 6603169954
Телефон: +380 (95) 633-03-15
Эл. почта: v-shevkoplyas@ukr.net

Статья поступила 18.05.2018 г.
© Л.Ф. Бутузова, В.Н. Шевкопляс, В.А. Колбаса, Г.Н. Бутузов, 2018
Рецензент д.х.н., проф. В.В. Приседский

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, НАПРАВЛЯЕМЫМ В РЕДАКЦИЮ

1. Основной текст статьи должен содержать такие необходимые элементы, выделенные заголовками, как:

– **постановка проблемы** в обобщенном виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;

– **анализ последних исследований и публикаций**, в которых начато решение данной проблемы и на которые опираются авторы, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья;

– формулировка **цели (задачи) исследования**;

– изложение **основного материала исследования** с полным обоснованием полученных научных результатов;

– **выводы** по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

2. Статья, основной текст вместе с рисунками и др. нетекстовыми элементами, должна быть объемом **8…10 полных** страниц формата А4 (210×297 мм) с полями **20** мм с каждой стороны. Рукопись статьи необходимо оформлять с помощью редактора MS Word. Шрифт – Times New Roman, **12** пт, стиль – обычный. Межстрочный интервал – одинарный. Расстановка переносов – автоматическая. Выравнивание – по ширине страницы. Страницы не нумеровать.

3. Структура статьи (каждый элемент с новой строки): код УДК; инициалы и фамилии авторов с указанием ученой степени каждого (количество авторов **не более 3-х** от одной организации); название организации, город, где работают авторы; название статьи; аннотация на русском языке (объемом **не более 300** символов); ключевые слова (**от 3 до 5**); основной текст статьи; список литературы. Сокращение слов в тексте, рисунках и таблицах не допускается.

В аннотации на русском языке сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

В конце статьи, после списка литературы приводятся инициалы и фамилии авторов, ученые степени, организации, города, название статьи, аннотация и ключевые слова на английском языке

Аннотация на английском языке должна представлять собой резюме, призванное выполнять функцию независимого от статьи источника информации. Резюме должно быть информативным (не содержать общих слов), оригинальным (не являться калькой аннотации на других языках), содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований), структурированным (следовать логике описания результатов в статье), компактным, но не коротким (объемом **от 250 до 300** слов). Типичная структура резюме: состояние вопроса (**Background**); материалы и/или методы исследования (**Materials and/or methods**); результаты (**Results**); заключение (**Conclusion**).

Внимание! Убедительная просьба не разбивать текст на колонки, как это сделано в журнале, т.к. это усложняет редакторскую обработку статьи!

4. **Обязательным условием** является наличие в статье графического материала (рисунков, графиков, схем, фотографий), размером **не менее 80×80** мм, в формате *.tif или *.jpg, разрешением **не менее 300** dpi. Графический материал внедренными объектами размещается по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Все позиции, обозначенные на рисунках, должны быть объяснены в тексте. Под каждым рисунком указывается его порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце). Рисунки должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

Внимание! Запрещается внедрять графические материалы в виде объектов, связанных с др. программами, например, с КОМПАС, MS Excel и т.п. Рисунки, выполненные непосредственно в MS Word не принимаются.

5. Математические формулы необходимо выполнять с помощью редактора формул **MS Equation Editor 3.0** в соответствии со следующими размерами: обычный символ – **11** пт; крупный индекс – **7** пт; мелкий индекс – **5** пт; крупный символ – **13** пт; мелкий символ – **8** пт.

Все величины, входящие в формулы, должны быть объяснены в тексте. Формулы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу. Формулы выполняются курсивом, **кроме цифр и символов греческого алфавита**. Формулы нумеруются (справа в круглых скобках, не отступая от формулы) **только в том случае**, если в тексте на них имеются ссылки.

Внимание! Количество формул в статье **не более 5**. Запрещается выполнять формулы с помощью MathCAD или др. аналогичных программ.

6. Таблицы должны иметь порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце) и располагаться по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Таблицы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

7. **Обязательным условием** является наличие в статье списка литературы, который приводится после выводов через один интервал (пустую строку) под заголовком **Список литературы**. Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу по тексту заключаются в квадратные скобки. В списке литературы должно быть **не менее 3-х** публикаций, вышедших **за последние 5** лет, а также **не менее 3-х** зарубежных (англоязычных) публикаций.

Для принятия решения о публикации статьи в журнале, в адрес редакции необходимо выслать:

– сопроводительное письмо (с указанием, что статья ранее нигде не публиковалась) от организации, где работают авторы, и сведения об авторах статьи;

– экспертное заключение о возможности опубликования материалов в прессе и других средствах массовой информации, заверенное печатью и подписью руководителя организации, где работают авторы;

– электронный вариант статьи (имя файла составляется из фамилий авторов, например, ИвановПетров.doc) и сведений об авторах (имя файла – ИвановПетров_sved.doc). *В сведениях об авторах для каждого соавтора обязательно должен быть указан телефон, адрес персональной эл. почты, а также коды регистрации в наукометрических базах данных.*

Для ускорения подготовки очередных номеров журнала, просьба передавать сопроводительное письмо в отсканированном виде, электронный вариант статьи и сведения об авторах по эл. почте на адрес: **vestnikdonntu@gmail.com**

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

Редакция оставляет за собой право возвращать статьи авторам на доработку в следующих случаях: статья небрежно оформлена и не соответствует требованиям редакции журнала, приведенным выше; статья требует доработки в соответствии с замечаниями рецензента и редакторов; отсутствует сопроводительное письмо от организации, где работают авторы или сведения об авторах.

Требования к рекламно-информационным материалам согласовываются непосредственно с редакцией журнала.

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