

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2017. Т.15, №3

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Сведения о журналах содержатся в международных базах данных Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, а также в ВИНИТИ и РИНЦ. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

Редакционный совет

Председатель редсовета:

Колокольцев В.М. – ректор
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
проф., д-р техн. наук, Магнитогорск, Россия.

Члены редсовета:

Горлач И. – д-р наук в области машиностроения;
руководитель отделения мехатроники университета
им. Нельсона Манделы, Южная Африка;
Дабала М. – проф., Факультет промышленного
инжиниринга Университета г. Падуа, Италия;
Дья Х. – проф., д-р техн. наук, директор Института
обработки металлов давлением и инженерии безопасности,
Ченстоховский Технологический Университет,
Ченстохова, Польша;
Дюссан Р.О. – проф., Руководитель факультета
металлургических технологий и наук о материалах,
Технологический институт, Мумбай, Индия;
Кавалла Р. – проф., директор института обработки металлов
давлением, Фрайбергская горная академия, Фрайберг, Германия;
Калмыков В.Н. – д-р техн. наук, проф.,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия;
Каплунов Д.Р. – член-кор. РАН, проф. ИПКОН РАН,
д-р техн. наук, Москва, Россия;
Мори К. – проф. Технологического
университета, Тойохаси, Япония;
Найзабеков А.Б. – академик, д-р техн. наук, проф., ректор
Рудненского индустриального института, Рудный, Казахстан;
Пьетшик М. – проф. горно-металлургической академии,
Краков, Польша;
Рашиников В.Ф. – Председатель совета директоров
ПАО «ММК», проф., д-р техн. наук, Магнитогорск, Россия;
Счастливец В.М. – зав. лабораторией ИФМ
УрО РАН; академик РАН, д-р техн. наук,
Екатеринбург, Россия.

Главный редактор:

Чукин М.В. – первый проректор-проректор
по научной и инновационной работе
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
проф., д-р техн. наук, Магнитогорск, Россия.

Первый зам. главного редактора:

Гун Г.С. – проф., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия.

Зам. главного редактора:

Гавришев С.Е. – проф., д-р техн. наук
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия;
Корчунов А.Г. – проф., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия;
Логунова О.С. – проф., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия;
Храмшин В.Р. – проф., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия.

Ответственные секретари:

Полякова М.А. – доц., канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия;
Шубина М.В. – доц., канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Россия.

Редактор: Кутекина Н.В.

Технический редактор: Гаврусева К.В.

Перевод на английский: Елесина В.И.

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017

Подписной индекс издания 48603 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Также подписку в оперативном режиме можно оформить и оплатить в удобной для Вас форме на подписной страничке сайта Агентства «Книга-Сервис» по ссылке:

код html: <http://www.akc.ru/itm/vestnik-magnitogorskogo-gosudarstvennogo-tehnicheskogo-universiteta-im-gi-nosova/>

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-59632 от 10.10.2014 г.

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связей, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.

(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.10.

Адрес редакции:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38
Тел.: (3519) 22-14-93.
URL: <http://www.vestnik.magtu.ru>
E-mail: rio_magtu@mail.ru; vestnik@magtu.ru

Журнал подготовлен к печати издательским центром
МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38.
Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова,
455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.
Выход в свет 26.09.2017. Заказ 400. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2017. Vol. 15, no. 3

The Journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD dissertations. Information about the Journal can be found in such international databases as Ulrich's Periodicals Directory and Crossref, as well as in the Russian VINITI database and the Russian Science Citation Index. The digital version of the Journal is available at eLIBRARY.RU.

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

Editorial Board Members

Chairman:

Kolokoltsev V.M. – D. Sc., Prof., Rector of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Honorary Board Members:

Gorlach I. – Ph.D., Head of Mechatronics Department, Nelson Mandela Metropolitan University, South Africa.

Dabalà M. – Prof., Department of Industrial Engineering, University of Padova, Italy.

Dyja H. – D.Sc., Prof., Director of the Institute of Metal Forming and Engineering Security, Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland.

Dusane R.O. – Prof., Head of Metallurgical Engineering & Materials Science Department, Institute of Technology Bombay, India.

Kalmykov V.N. – D.Sc., Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Kaplunov D.R. – D.Sc., Prof., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences. Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Moscow, Russia.

Kawalla R. – Prof., Director of the Metal Forming Institute, Freiberg University of Mining and Technology, Freiberg, Germany.

Mori K. – Prof., Toyohashi University of Technology, Japan.

Naizabekov A.B. – D.Sc., Prof., Member of the Academy of Sciences, Rector of Rudny Industrial Institute, Rudny, Republic of Kazakhstan.

Pietrzyk M. – Prof., Akademia Gorniczo-Hutnicza, Krakow, Poland.

Rashnikov V.F. – D.Sc., Prof., Chairman of the PJSC MMK Board of Directors, Magnitogorsk, Russia.

Schastlivtsev V.M. – D. Sc., Chief of the Laboratory, Institute of Metal Physics, Ural Division of the Russian Academy of Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.

Editor-in-Chief:

Chukin M.V. – D.Sc., Prof., First Vice-Rector-Vice-Rector for Science and Innovation, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

First Deputy Editor-in-Chief:

Gun G.S. – D.Sc., Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Deputy Editor-in-Chief:

Gavrishev S.E. – D.Sc., Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Korchunov A.G. – D.Sc., Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Logunova O.S. – D.Sc., Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Khramshin V.R. – D.Sc., Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Executive Editors:

Polyakova M.A. – Ph.D., Assoc. Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Shubina M.V. – Ph.D., Assoc. Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Editor:

Kutekina N.V.

Technical Editor:

Gavruseva K.V.

Translated into English:

Elesina V.I.

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2017

Registration certificate PI # FS 77-59632 dated October 10, 2014 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University
(38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)

16+ in accordance with Federal Law #436-FZ dated 29.12.10

Editorial office:

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia

Phone: +7 (3519) 221 493.

URL: <http://www.vestnik.magtu.ru>

E-mail: rio_magtu@mail.ru; vestnik@magtu.ru

Prepared for the publication by the NMSTU publishing center,

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia

Printed by the NMSTU printing section,

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia.

Publication date: 26.09.2017. Order 400. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых.....	5
<i>Калмыков В.Н., Петрова О.В., Мамбетова Ю.Д.</i> Оценка устойчивости функционирования горнотехнической системы при подземной разработке медно-колчеданных месторождений	5
<i>Селюков А.В.</i> Выработанное пространство угольных разрезов: развитие классификационных признаков.....	12
<i>Чебан А.Ю.</i> Способ и оборудование для открытой разработки маломасштабных крутопадающих месторождений.....	18
Металлургия черных, цветных и редких металлов	24
<i>Мальцев Г.И., Тимофеев К.Л., Попов А.И.</i> Термодинамическое прогнозирование восстановительной плавки свинцового кека	24
Литейное производство.....	31
<i>Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Биалов Д.Х.</i> Литье и обжатие тонких слябов при получении листов из стали для сварных труб на установке непрерывного литья и деформации.....	31
Обработка металлов давлением.....	37
<i>Тишчук Л.И., Соломонов К.Н., Мазур И.П., Кнапински М., Федоринин Н.И.</i> Исследование картины течения металла при осадке.....	37
Материаловедение и термическая обработка металлов.....	45
<i>Азимов Х.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Джураева М.Ш.</i> Сравнительное исследование анодного поведения сплава АЖ2,18, модифицированного литием, бериллием и магнием, в среде электролита NaCl.....	45
Стандартизация, сертификация и управление качеством	54
<i>Мезин И.Ю., Гун И.Г., Лимарев А.С., Ушаков М.Ю., Стеблянка В.Л., Федосеев С.А.</i> Современные подходы к управлению качеством продукции для железнодорожной отрасли.....	54
Моделирование металлургических процессов	62
<i>Смирнов А.Н., Алексеев Д.И.</i> Сопоставление и анализ адекватности математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса М ₂₅ и М ₁₀	62
Надежность и долговечность металлургического оборудования	68
<i>Енин С.С., Омельченко Е.Я., Белый А.В., Фомин Н.В.</i> Описание движения механизмов мостового крана уравнениями Лагранжа II рода	68

CONTENTS

Mineral Mining	5
<i>Kalmykov V.N., Petrova O.V., Mambetova Yu.D.</i> Evaluating the sustainability of the mining system in underground copper-pyrite mining	5
<i>Selyukov A.V.</i> The mined-out space of coal pits: development of classification features	12
<i>Cheban A.Yu.</i> Method and equipment for opencast mining of small steeply dipping deposits	18
Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals	24
<i>Maltsev G.I., Timofeev K.L., Popov A.I.</i> Thermodynamic prediction of reduction smelting of lead cake	24
Metal Casting	31
<i>Lehov O.S., Bilalov D.G., Mikhalev A.V., Shevelev M.M.</i> Thin slab casting and rolling when producing steel plates for welded pipes on a continuous casting and rolling plant	31
Metal Forming.....	37
<i>Tishchuk L.I., Solomonov K.N., Mazur I.P., Knapinski M., Fedorinin N.I.</i> Study of metal flow pattern during upsetting.....	37
Materials Science and Heat Treatment of Metals	45
<i>Azimov Kh.H., Ganiev I.N., Amonov I.T., Juraeva M.Sh.</i> A comparative study of the anodic behaviour of the alloy AZh2,18 inoculated with lithium, beryllium and magnesium in NaCl.....	45
Standardization, Certification and Quality Management.....	54
<i>Mezin I.Yu., Gun I.G., Limarev A.S., Ushakov M.Yu., Steblyanko V.L., Fedoseev S.A.</i> Modern approaches to quality management for railway industry	54
Simulation of Metallurgical Processes.....	62
<i>Smirnov A.N., Alekseev D.I.</i> Comparison and adequacy analysis of the mathematical models for predicting the M25 and M10 coke quality indices	62
Reliability and Service Life of Metallurgical Facilities	68
<i>Enin S.S., Omelchenko E.Ya., Beliy A.V., Fomin N.V.</i> The motion of bridge crane mechanisms described with the help of Lagrange's equations of second kind.....	68

Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы	74
<i>Николаев А.А.</i>	
Разработка усовершенствованной методики выбора мощности статического тиристорного компенсатора дуговой сталеплавильной печи	74
Теплоэнергетика металлургической отрасли.....	95
<i>Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Герасименко Н.П.</i>	
Исследование и моделирование процессов теплообмена с помощью лабораторных установок рекуперативного типа.....	95
Сведения об авторах.....	102

Power Engineering in Metallurgy, Energy Saving and Electrotechnical Systems	74
<i>Nikolaev A.A.</i>	
Development of an improved method for selecting the power of a static var compensator for electric arc furnaces	74
Heat Power Engineering of the Metallurgical Industry	95
<i>Gerasimenko T.E., Meshkov E.I., Gerasimenko N.P.</i>	
Research and simulation of heat transfer processes with the help of laboratory-scale recuperators	95
Information about authors	102

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.013

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-5-11>

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГОРНТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕДНО-КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Калмыков В.Н.¹, Петрова О.В.¹, Мамбетова Ю.Д.²¹ ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия² ООО «УралГеоПроект», Магнитогорск, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): анализ опыта отработки медно-колчеданных месторождений подземным способом показал, что практически все они характеризуются неблагоприятными горно-геологическими условиями, при которых существующие принципы проектирования горнотехнической системы не обеспечивают стабильных показателей эффективности горного производства и требуемую устойчивость в условиях колебаний цен на металлы, изменчивости содержания металла в руде и др., что приводит к временному прекращению горных работ из-за снижения технико-экономических показателей. Своевременная оценка устойчивости функционирования горнотехнической системы позволит осуществить выбор наиболее оптимального комплекса, а методика, предложенная на основе коэффициента устойчивости горнотехнической системы, позволяет определить параметры резервов, которые компенсируют негативное влияние ухудшения рыночных и горно-геологических условий отработки при подземной разработке медно-колчеданных месторождений. **Цель работы:** повышение эффективности горных работ в период снижения устойчивости горнотехнической системы в результате падения цен на металлы и ухудшения горно-геологических условий подземной разработки медно-колчеданных месторождений. **Используемые методы:** комплексный подход, включающий анализ и обобщение достижений науки, техники и практики проектирования и эксплуатации медно-колчеданных месторождений, результатов отечественных и зарубежных исследований; экономико-математическое моделирование и технико-экономические расчеты с обработкой данных методами математической статистики. **Новизна:** к элементам новизны относится предложенный коэффициент устойчивости функционирования горнотехнической системы, который учитывает технологические, экономические, горно-геологические факторы. **Результат:** предложенный коэффициент устойчивости позволит осуществить прогнозную и текущую оценку уровня устойчивости горнотехнической системы при подземной разработке, оперативно реагировать на изменения множества факторов, которые оказывают на нее влияние, и разработать дальнейшую стратегию развития предприятия. **Практическая значимость:** своевременная оценка устойчивости функционирования горнотехнической системы позволит осуществить выбор наиболее оптимальных технологических решений, направленных на ее обеспечение.

Ключевые слова: устойчивость функционирования горнотехнической системы, управляемые и неуправляемые факторы, коэффициент устойчивости горнотехнической системы, периоды устойчивости и неустойчивости.

Введение

Анализ состояния горных работ медно-колчеданных месторождений Южного Урала, обрабатываемых подземным способом, показал, что большинство из них на сегодняшний день находится на стадии доработки, а горнотехническая обстановка характеризуется ухудшением горно-геологических условий, среди которых следует выделить возрастание горного давления, связанное с переходом горных работ на более глубокие горизонты (Юбилейное, Гайское и др.), снижение содержания полезных компонентов в руде (Ново-Учалинское), усложнение морфологии и строения рудных тел, увеличение доли труднообогатимых руд (Озерное). Освоение месторождений осу-

ществляется на фоне постоянных колебаний цен на металлы, курса доллара, что приводит к нарушению устойчивости функционирования горнотехнической системы за счет вынужденных простоев, отклонений от проектных технико-экономических показателей и корректировок планов производства, которые вызваны повышением себестоимости добычи руды на фоне снижения ценности добываемого сырья [1, 2].

Технические и технологические решения

Под устойчивостью функционирования горнотехнической системы понимается способность системы поддерживать параметры на заданном уровне, эффективно противодействуя влиянию внешних воздействий [3].

Анализ технико-экономических показателей

горных предприятий Южного Урала показал, что на устойчивость функционирования горнотехнической системы оказывает влияние совокупность внешних и внутренних факторов [4], которые в зависимости от возможности воздействия на них подразделяются на управляемые и неуправляемые (рис. 1).

Факторы, влияющие на устойчивость функционирования горнотехнической системы при подземной разработке месторождений, предлагается подразделять на следующие группы: технологические, технические, организационные, экологические, горно-геологические и рыночные.

Технологические факторы, а именно объем добычи, способ вскрытия, технология очистной выемки и др., уже на стадии проектирования оказывают существенное влияние на показатели функционирования горнотехнической системы, так как во многом определяют капитальные и эксплуатационные затраты и, как следствие, принятие решения о целесообразности освоения запасов. На стадии эксплуатации месторождения стабильная работа подземного рудника и требуемые показатели эффективности в большей мере определяются техническими и организационными факторами за счет их направленности на обеспечение необходимого уровня производительности, надежности.

На сегодняшний день большое внимание уделяется и экологической составляющей, т.к. отходы добычи, минерализованные промышленные стоки и подземные выработанные пространства необходимо рассматривать не только с точки зре-

ния их негативного влияния на окружающую среду, но и как техногенные георесурсы, освоение которых позволит расширить минерально-сырьевую базу наряду с сокращением экологического воздействия [4].

Существенное влияние на устойчивость функционирования горнотехнической системы оказывают рыночные и горно-геологические факторы, так как именно они являются исходными данными при принятии технологических решений по отработке месторождения и по своей сути являются неуправляемыми, то есть предприятие не может на них воздействовать. В результате непостоянства неуправляемых факторов, таких как содержание металлов в руде, цена на металлы и др., они оказывают наибольшее влияние на параметры горнотехнической системы.

Степень устойчивого функционирования горнотехнической системы при подземной разработке рудных месторождений возможно оценивать с помощью коэффициента устойчивости функционирования горнотехнической системы, который показывает насколько может снижаться эффективность освоения запасов до того, как отработка месторождения окажется в зоне убытков. Коэффициент устойчивости горнотехнической системы и его нормативное значение принято по аналогии с коэффициентом запаса финансовой прочности. Нормативное значение составляет 10% согласно исследованиям Замбражицкой Е.С., Жданова И.Ю., Стояновой Е.С., Павловой Л.П. и других ученых [5].

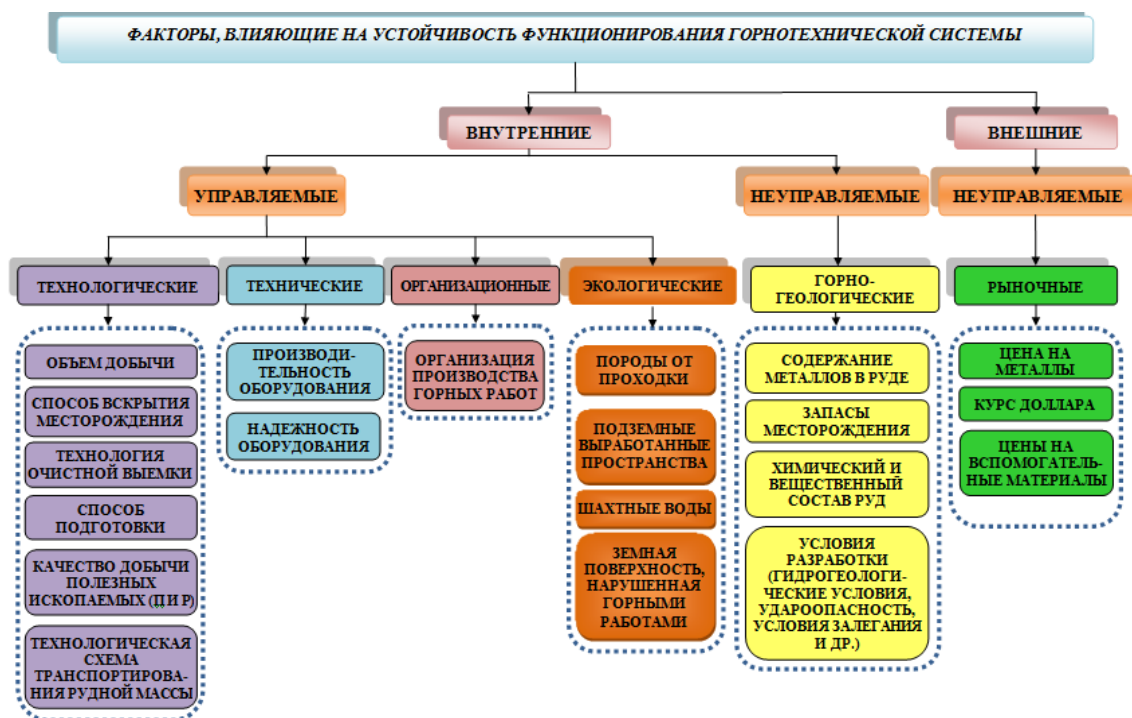


Рис. 1. Факторы, влияющие на устойчивость функционирования горнотехнической системы при подземной разработке рудных месторождений

$$K_{уст} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m 3_{ji} \cdot Q_{ji} + 3_{п} + P_{п} + A)}{\sum_{i=1}^n A_i \cdot C_i \cdot \varepsilon (1 - P_i) \cdot \Pi_i \cdot k_{\$} + \sum_{k=1}^n \Pi_k \cdot Q_k} \right) \cdot 100 \geq 10\%, \quad (1)$$

где $i=1...n$ – вариант системы разработки месторождения; 3_{ji} – удельные переменные затраты на j -й процесс при i -м варианте системы разработки, руб./т (руб./м³, руб./пог.м, руб./ткм); Q_{ji} – объем работ, выполняемых в j -м процессе при i -м варианте системы разработки, т (м³, пог.м, ткм); $3_{п}$ – постоянные затраты (вентиляция, водоотлив и др.), руб.; $P_{п}$ – прочие расходы (в том числе налог на добычу полезного ископаемого, экологические платежи), руб.; A – амортизация, руб.; A_i – производственная мощность при i -м варианте системы разработки, т/год; C_i – содержание металла в руде, доли ед.; ε – извлечение полезного компонента при обогащении, доли ед.; P_i – разубоживание руды, доли ед.; Π_i – цена на металл на LME, \$./т; $k_{\$}$ – курс доллара руб./\$; Π_k – ценность k -го техногенного георесурса, руб.; Q_k – объем k -го техногенного георесурса, т.

Использование коэффициента устойчивости позволяет осуществить прогнозную и текущую оценку уровня устойчивости горнотехнической системы при подземной разработке и оперативно реагировать на изменения множества факторов, которые оказывают на нее влияние.

Для оценки степени влияния факторов на устойчивость функционирования горнотехнической системы произведено экономико-математическое моделирование условий подземной разработки медно-колчеданных месторождений при использовании систем разработки различного класса и производственной мощности рудника до 1, от 1 до 3 и более 3 млн т/год (рис. 2) [6-8].

Анализ результатов расчета показал, что наибольшее влияние на устойчивость горнотехнической системы при подземной разработке медно-колчеданных месторождений оказывают производственная мощность рудника и применяемая система разработки. В зависимости от применяемой технологии степень влияния цены на медь, содержания меди в руде и неподтверждения запасов разная. Наиболее устойчивы к изменению рыночных и горно-геологических факторов горнотехнические системы с системой разработки с обрушением руд и вмещающих пород, наименее устойчивы к изменениям системы разработки с горизонтальными слоями с закладкой.

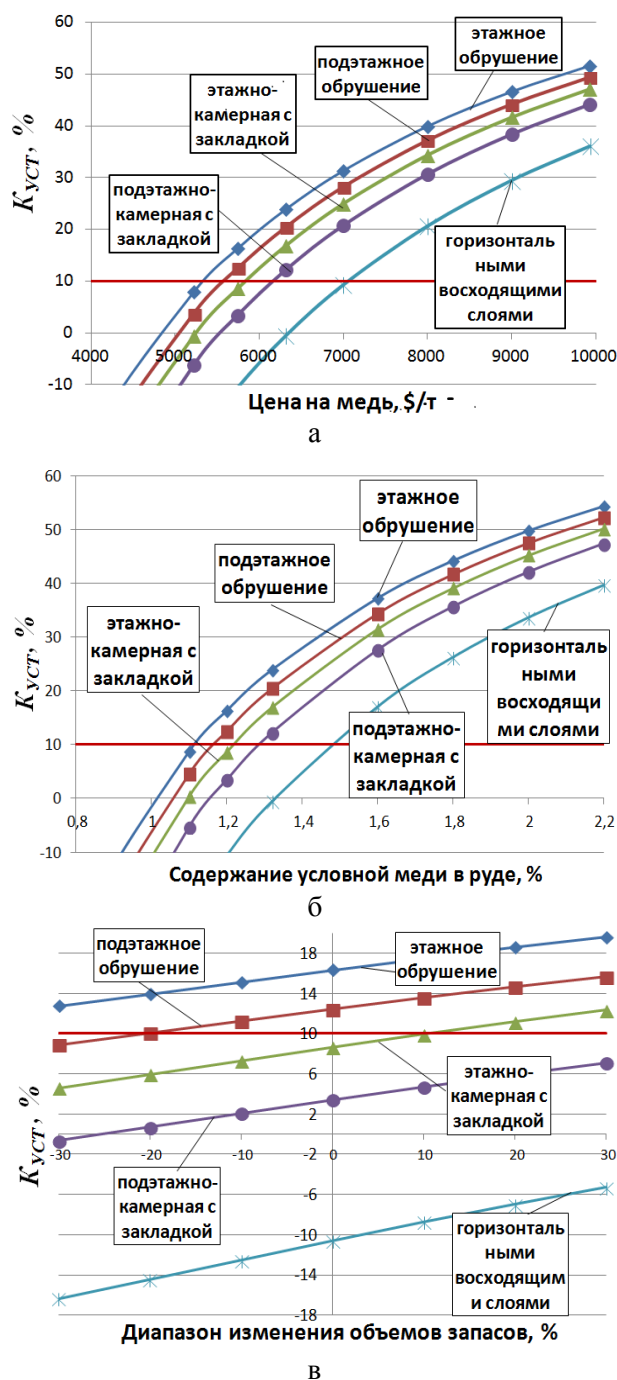


Рис. 2. Зависимость коэффициента устойчивости горнотехнической системы от цены на металл (а), содержания меди в руде (б), объемов запасов (в) при производственной мощности подземного рудника до 1 млн т/год

В рамках горнотехнической системы установлено, что наибольшее влияние на коэффици-

ент устойчивости оказывают цены на медь и ее содержание в руде (снижение на 10% приводит к потере уровня устойчивости горнотехнической системы в 1,2–4 раза). Менее значимым является фактор неподтверждения данных по запасам – при уменьшении запасов на 10 % коэффициент устойчивости снижается в 1,1–1,7 раз в зависимости от применяемого вида системы разработки и производственной мощности рудника.

Из результатов экономико-математического моделирования следует, что компенсировать потерю устойчивости возможно снижением затрат на добычу полезного ископаемого, регулированием объемов добычи, перехода на системы разработки другого класса, перехода на участки с более высоким содержанием меди в руде или поддержанием высоких показателей качества добычи и др.

Функционирование горнотехнической системы осуществляется в условиях совокупного влияния рыночных и горно-геологических факторов. Анализ динамики цены на медь за период 2008–2015 гг. показал, что ее изменения носят циклический характер, при котором быстрый рост сменяется затяжным падением. Вместе с тем при подземной разработке большинства медно-колчеданных месторождений наблюдается снижение с глубиной отработки содержания меди в руде на 0,15 % каждые 40–60 м. Вовлекаемые на сегодняшний день в разработку запасы имеют категорию В+С₁, ошибка подсчета которых составляет ± 30–60%. Поэтому была поставлена задача оценить динамику коэффициента устойчивости в условиях изменения цены на медь и снижения содержания меди в руде при подземной разработке медно-колчеданных месторождений и неподтверждения данных по запасам при применении различных вариантов систем разработки и производственной мощности рудника до 1, от 1 до 3 и более 3 млн т/год (рис. 3).

Из анализа полученных графических данных следует, что в результате неподтверждения данных по запасам на 10, 20 и 30% срок отработки месторождения сокращается соответственно на 1, 2 и 3 года.

Из графика видно, что в зависимости от применяемой системы разработки коэффициент устойчивости горнотехнической системы на различных этапах функционирования разный, что определяет наличие периодов устойчивости, когда $K_{уст} \geq 10\%$, и неустойчивости, когда $K_{уст} \leq 10\%$. Длительность периода неустойчивости и уровень снижения коэффициента устойчивости будет определять ущерб, который в результате потери устойчивости необходимо компенсировать. Результатами экономико-математического моделирования установлено,

что длительность периода устойчивости составляет 0,5–1,2 года, при этом снижение коэффициента устойчивости может составлять от –8,4 до –58,8 %, что свидетельствует о неэффективности функционирования горнотехнической системы.

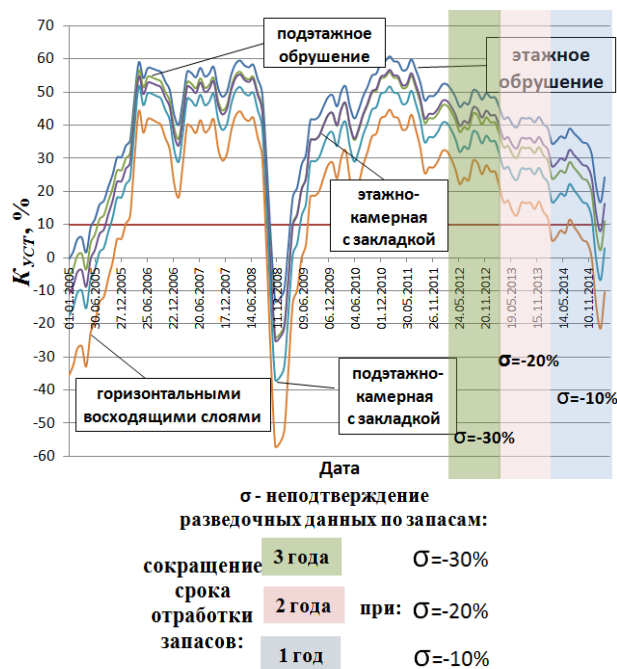


Рис. 3. Динамика коэффициента устойчивости горнотехнической системы при изменении цены на медь и содержания меди в руде при производственной мощности рудника 1–3 млн т/год

Анализ периодов устойчивости показал, что их длительность составляет 2,5–6 лет при значении коэффициента устойчивости от 43,1 до 61,2 %, что говорит о достаточности финансовых и временных возможностей для формирования технологических резервов, направленных на компенсацию ущерба от снижения коэффициента устойчивости.

Учитывая, что срок отработки большинства медно-колчеданных месторождений составляет 20–30 лет, можно прогнозировать периоды неустойчивости каждые 3–7 лет длительностью от 0,5 до 15 мес, когда горнотехническая система будет функционировать неэффективно [9–12].

Анализ периодов устойчивости показал, что их длительность составляет 3–5 лет, что позволяет за это время формировать технологические решения в виде резервов, направленных на повышение качества добываемого сырья, повышения производительности оборудования и др., которые позволят поддержать проектные технико-экономические показатели и обеспечить

устойчивость функционирования горнотехнической системы при подземной разработке месторождения в период негативного влияния изменения цен на металлы, ухудшения горно-геологических условий. Учитывая, что коэффициент устойчивости функционирования в период устойчивого функционирования при разных системах разработки разный, что определяет различный объем прибыли, необходимо формировать технологические резервы в зависимости от технологии и интенсивности отработки.

Для условий медно-колчеданных месторождений Учалинское, Ново-Учалинское и Озерное, отрабатываемых либо планируемых к отработке подземным способом, произведена оценка уровня устойчивости горнотехнической системы (см. таблицу).

Результаты расчета коэффициента устойчивости для условий медно-колчеданных месторождений Учалинское, Ново-Учалинское и Озерное

Показатели	Условное обозначение	Значения		
		Учалинское	Ново-Учалинское	Озерное
Месторождения	–			
Содержание меди в руде (приведенное содержание п.к. в руде), %	C_m	1,75	1,8	2,27
Цена на медь на 15.01.2016 \$/т	C_m	4300		
Курс доллара, руб./\$	$K_{\$}$	71		
Производственная мощность рудника, тыс.т/год	A_r	1500	2500	400
Разубоживание, %	P	10,3	8	5
Потери, %	Π	4,9	6	5
Удельный объем подготовительно-нарезных работ, м ³ /тыс.т	$V_{\text{пнр уд}}$	60	35	61
Коэффициент устойчивости горнотехнической системы	$K_{\text{уст}}$	7	13	18

Анализ результатов расчета показал, что при цене 4300 \$/т горнотехническая система при отработке месторождений Ново-Учалинское и Озерное будет функционировать устойчиво. Однако дальнейшее падение цены ниже 4000 \$/т приведет к потере устойчивости, и предприятие будет функционировать неэффективно. При отработке месторождения Учалинское при цене 4300 \$/т происходит потеря устойчивости. При

своевременной оценке и подготовке резервов устойчивости горнотехнической системы возможно было сохранить на уровне 10%.

Заключение

Таким образом, при подземной разработке медно-колчеданных месторождений влияние рыночных и горно-геологических факторов приводит к потере устойчивости горнотехнической системы. Постоянные колебания цен на металлы и снижение с глубиной содержания полезных компонентов в руде обуславливают зоны устойчивого и неустойчивого функционирования горнотехнической системы. Длительность периодов устойчивости функционирования горнотехнической системы составляет 0,5–15 мес, что позволяет сформировать резервы для компенсации спада коэффициента устойчивости в результате негативного влияния неуправляемых факторов.

Использование критерия для оценки устойчивости функционирования горнотехнической системы позволит осуществить выбор наиболее оптимальных технологических решений, направленных на обеспечение устойчивости горнотехнической системы в период негативного влияния экономических факторов.

Список литературы

1. Радченко Д.Н. К вопросу обоснования рациональных масштабов эксплуатации запасов рудных месторождений для устойчивого развития горнотехнических систем // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр / под ред. акад. К.Н. Трубецкого. М.: ИПКОН РАН, 2014. С. 246–249.
2. Пешков А.М. Обоснование требований к качеству руд и техногенного сырья при комплексном освоении медно-колчеданных месторождений Урала: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.21 / Пешков Алексей Михайлович. М., 2014. 160 с.
3. Батугина Н.С., Ткач С.М., Баракаева И.Д. Факторы внешней и внутренней среды как элементы управления эффективностью функционирования горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. №10. С. 70–75.
4. Пронин Э.М., Васильев В.Е., Цветков В.Ю. Факторы, определяющие устойчивое развитие предприятий минерально-сырьевого комплекса, и их влияние на оценку результатов деятельности предприятий // Экономические проблемы развития минерально-сырьевой и топливно-энергетического комплексов России. Санкт-Петербург, 2011. 337 с.
5. Замбрицкая Е.С., Скрылева Г.И. Запас финансовой прочности, как показатель оценки экономической эффективности инвестиционных проектов по созданию производственных объектов // Молодой ученый. 2013. №2. С. 128–132.

6. Каплунов Д.Р., Юков В.А. Оценка условий обеспечения устойчивого функционирования горнотехнических систем в условиях неопределенности исходной горно-геологической информации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. №4. С. 400–409.
7. Калмыков В.Н., Петрова О.В., Янтурина Ю.Д. Оценка технологических резервов обеспечения устойчивого развития горнотехнической системы при подземной разработке рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2014. №10. С. 69–77.
8. Nikolaev M. V., Grigorieva E. E., Gulyaev P. V. Assessment of risks influencing innovation activity of industrial enterprises (on example of diamond-brilliant complex). Eurasian mining. 2016. №2, pp. 8–14.
9. Simon Walker. Tools to assist in Planning and Design. Engineering and Mining Journal. 2013 January, pp. 34–39.
10. Jesse Morton. Mine Planning Software Empowers Grade Controllers. Engineering and Mining Journal. 2017, February, pp. 28–33.
11. Соколов И.В., Барановский К.В. Выбор эффективной технологии подземной разработки месторождения кварца // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. №2. С. 10–17.
12. Каплунов Д.Р., Юков В.А. Предварительная оценка допустимой величины колебаний основных показателей работы рудника // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. №9. С. 5–12.

Поступила 10.05.17.

Принята в печать 23.08.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-5-11>

EVALUATING THE SUSTAINABILITY OF THE MINING SYSTEM IN UNDERGROUND COPPER-PYRITE MINING

Vyacheslav N. Kalmykov – D.Sc. (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: prmpi@maqtu.ru

Olga V. Petrova – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: prmpi@maqtu.ru

Yuliya D. Mambetova – Ph.D. (Eng.), Lead Specialist
UralGeoProekt LLC, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mambetova_yuliya@bk.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): Analysis of the copper-pyrite underground mining history showed that almost all the mines face adverse mining and geological conditions, under which the actual design principles for mining systems fail to deliver stable performance and desired sustainability considering the fluctuation of metal prices, the variability of metal concentrations, etc. A drop in performance indicators may necessitate suspension of mining operations. Due to a timely evaluation of the sustainability level of the mining system in place, the mine operator can determine what complex of equipment will offer the best value. The proposed approach, which is based on the mining system sustainability index, allows to determine what parameters of the reserves will help offset the negative impact of deteriorating market and geological conditions in underground copper-pyrite mining. **Objectives:** The objective of this research is to increase the efficiency of mining operations in a period of declining sustainability of the mining system resulting from falling metal prices and deteriorating geological conditions in underground copper-pyrite mining. **Methods Applied:** A comprehensive approach that includes analysis and synthesis of scientific, technological and

practical achievements in design and exploitation of copper-pyrite deposits, as well as the results obtained by both Russian and foreign researchers; mathematical modelling and feasibility studies with the methods of mathematical statistics applied for data processing. **Originality:** The original features of this research include the proposed mining system sustainability index, which takes into account operational, economic, mining and geological factors. **Findings:** The proposed sustainability index will help evaluate the current and expected sustainability of an underground mining system, quickly respond to changes of multiple impact factors and elaborate a further development strategy for the mining company. **Practical Relevance:** A timely evaluation of the mining system sustainability will help identify the best solutions to ensure its continuity.

Keywords: Mining system sustainability, controllable and uncontrollable factors, mining system sustainability index, periods of stability and instability.

References

1. Radchenko D.N. On justification of rational exploitation of ore reserves for sustainable development of mining sys-

- tems. *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya i sokhraneniya zemnykh nedr* [Problems and prospects of comprehensive development and conservation of mineral resources]. Ed. by K.N. Trubetskoy. Moscow: Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, 2014, pp. 246–249.
2. Peshkov A.M. Substantiating the requirements to the quality of ores and industrial raw materials in the comprehensive development of copper-pyrite deposits of the Urals: Ph.D. dissertation. Moscow, 2014, 160 p.
 3. Batugina N.S., Tkach S.M., Barakaeva I.D. Factors of external and internal environment that can be used to control the efficiency of mining sites. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining bulletin (scientific journal)]. 2008, no. 10, pp. 70–75.
 4. Pronin E.M., Vasilyev V.E., Tsvetkov V.Yu. Factors determining the sustainable development of companies in the mineral resources sector, and their impact on the companies' performance analysis. *Ekonomicheskie problemy razvitiya mineralno-syrievogo i toplivno-energeticheskogo kompleksov Rossii* [Economic problems of developing mineral resources and energy sectors of Russia]. Saint-Petersburg, 2011, 337 p.
 5. Zambrzhitskaya E.S., Skryleva G.I. Financial safety as an indicator of economic efficiency of investment projects aimed at creating production facilities. *Molodoy ucheniy* [Young scientist], 2013, no. 2, pp. 128–132.
 6. Kaplunov D.R., Yukov V.A. Analysis of the conditions ensuring sustainability of the mining system in the situation when the initial geological information is lacking certainty. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining bulletin (scientific journal)], 2013, no. 4, pp. 400–409.
 7. Kalmykov V.N., Petrova O.V., Yanturina Yu.D. Analysis of the reserves for ensuring sustainable development of a mining system in underground ore mining. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal). Otdelnye statyi (spetsialnyi vypusk)* [Mining bulletin (scientific journal). Individual publications (special issue)], 2014, no. 10, pp. 69–77.
 8. Nikolaev M.V., Grigorieva E.E., Gulyaev P.V. Assessment of risks influencing innovation activity of industrial enterprises (on the example of the diamond-brilliant complex). *Eurasian mining*. 2016, no. 2, pp. 8–14.
 9. Simon Walker. Tools to assist in Planning and Design. *Engineering and Mining Journal*. 2013, January, pp. 34–39.
 10. Jesse Morton. Mine Planning Software Empowers Grade Controllers. *Engineering and Mining Journal*. 2017, February, pp. 28–33.
 11. Sokolov I.V., Baranovskiy K.V. Selection of an efficient mining system for underground mining of quartz. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, no. 2, pp. 10–17.
 12. Kaplunov D.R., Yukov V.A. A preliminary estimation of the allowable fluctuations of the key mine performance indicators. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining bulletin (scientific journal)], 2011, no. 9, pp. 5–12.

Received 10/05/17

Accepted 23/08/17

Образец для цитирования

Калмыков В.Н., Петрова О.В., Мамбетова Ю.Д. Оценка устойчивости функционирования горнотехнической системы при подземной разработке медно-колчеданных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. №3. С. 5–11. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-5-11>

For citation

Kalmykov V.N., Petrova O.V., Mambetova Yu.D. Evaluating the sustainability of the mining system in underground copper-pyrite mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 5–11. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-5-11>

ВЫРАБОТАННОЕ ПРОСТРАНСТВО УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ: РАЗВИТИЕ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ

Селюков А.В.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Кемерово, Россия

Аннотация

Кузбасс является одним из крупнейших освоенных угольных бассейнов Российской Федерации, большая часть запасов, пригодная для открытых горных работ, сосредоточена в залежах наклонного и крутого падения. Повсеместно применяемая углубочная продольная одно- или двухбортовая система разработки способствует прогрессирующему темпу нарушения земной поверхности как горными работами, так и внешними отвалами. Отраслевая землеемкость в Кемеровской области в 3–4 раза превышает показатели по другим бассейнам страны. Отрицательное влияние на окружающую природную среду можно сократить, если изменить порядок отработки угольных разрезов, используя при этом техногенный ресурс выработанного пространства карьерного поля, как емкость под складирование вскрыши. Если этого не предусмотреть в проектах горных предприятий, то карьерные поля разрезов будут ограничены собственными отвалами вскрышных пород, и их дальнейшее развитие будет проблематичным. Данные технологические решения направлены на устранение вышеуказанных недостатков углубочных систем разработки и к тому же существует устойчивое направление в общей технической политике производителей угля на увеличение доли внутреннего отвалообразования. Выработанное пространство, ранее считавшееся недоступным для размещения вскрышных пород, как в начальный, так и основной периоды эксплуатации карьера, может быть эффективно использовано путем целенаправленных воздействий. По мере эксплуатации угольного разреза, выработанное пространство представляет объемную пространственную фигуру, заключенную между двумя поверхностями – природной и техногенной. В отличие от современных и анализируемых в публикации источников научно-технической литературы, автором предлагается интерпретация классификационных признаков, впервые аккумулирующих пространственные геометрические формы сечений выработанного пространства. По результатам статистической обработки технической документации угольных разрезов Кемеровской области установлены закономерности, позволяющие идентифицировать пространственное постоянство геометрических форм выработанного пространства. Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании действующих разрезов в части определения объемов складирования вскрыши во внутренний отвал.

Ключевые слова: разрез, выработанное пространство, пространственная форма, признаки, закономерности.

Введение

Начиная с ввода в эксплуатацию первых угольных разрезов Кемеровской области и до настоящего времени, доминирующее положение занимает углубочная продольная система разработки, которая характеризуется размещением пород вскрыши на внешнем отвале вскрышных пород, что способствует прогрессирующему темпу изъятия земельных угодий. Все это повышает затраты на добычу угля открытым способом. Следовательно, применяемые технологические решения не всегда отвечают условиям экологических требований. Негативное влияние открытых горных работ можно сократить, если целенаправленно воздействовать на техногенный ресурс выработанного пространства. С конца семидесятых годов прошлого столетия при производстве открытой угледобычи начинает развиваться направление экологически безопасных и ресурсосберегающих технологий, базирующихся на трудах ученых-горняков нашей страны. Зачастую внедренные в производственную практику инженерные

решения основываются на морально устаревших и шаблонных проектных решениях. Однако в работах [1–9] предлагается теоретическая модернизированная база, расширяющая потенциалы технологического развития внутреннего отвалообразования. Анализ представленных работ показывает, что недостаточное внимание уделено выявлению и изучению пространственных конфигураций выработанного пространства в зависимости от периода эксплуатации угольного разреза. Таким образом, в работе предлагается методологический подход (предлагаемые в авторской интерпретации взаимоувязываемые классификационные признаки) к оценке выработанного пространства карьерного поля угольного разреза, основанный на учете:

- пространственной геометрии рабочих бортов карьерного поля;
- привязки главного направления развития горных работ относительно свиты угольных пластов;
- динамики развития рабочей зоны как по простиранию, так и по падению залежи;
- соотношения в горизонтальной плоскости положения дна карьерного поля;

- идентификации геометрической формы сечения выработанного пространства за время эксплуатации действующего разреза;
- пространственного постоянства геометрической формы выработанного пространства.

Постановка проблемы

В настоящее время на разрезах Кемеровской области при разработке наклонных и крутопадающих залежей, начиная с ввода в эксплуатацию первых угольных разрезов (с конца 40-х годов прошлого столетия), преимущественное распространение получила углубочная продольная одно- или двухбортовая система разработки (классификация академика В.В. Ржевского) [10]. При использовании такого порядка разработки основное направление горных работ ориентировано в основном на наиболее мощный(е) пласт(ы) свиты. Исходя из этого пространственно формируется объемная геометрическая фигура карьерного поля, а вместе с ней и выработанное пространство. В промежуточном или конечном положении представляет собой объем, заключенный между двумя топографическими поверхностями, одна из них действующая и относится к рабочей зоне (отрезок с-а-b-d), возникает и перемещается в пространстве в результате производства горных работ, а другая – природная, характеризующая рельеф поверхности (отрезок с-d) (рис. 1).

На рис. 1 приняты следующие обозначения: Нк – глубина карьерного поля; Нтек – текущая глубина; Вк верх – ширина карьерного поля по верху; Вк дно – ширина карьерного поля по дну; $\gamma_{рб}$ – угол наклона рабочего борта карьера; $\gamma_{вб}$ – угол наклона борта с висячего бока залежи; $\gamma_{лб}$ – угол наклона борта со стороны лежачего бока залежи; α – угол падения залежи.

Техногенная поверхность – это борта карьера, представляющие собой ломаную плоскость, состоящую из рабочих площадок и берм различного назначения. При проектировании разрезов углы наклона бортов карьеров определяются индивидуально для каждого карьера и зависят от множества влияющих факторов геологического, физико-механического и технологического характеров. Для наклонной залежи (рис. 1, а) формируются борта: со стороны висячего бока залежи ($\gamma_{вб}$) или рабочий борт залежи ($\gamma_{рб}$) и транспортный борт со стороны лежачего бока залежи ($\gamma_{лб}$) или борт, равный средневзвешенному углу падения пластов свиты (α). Отличительной чертой разработки крутопадающей залежи является формирование рабочего борта со стороны лежачего бока (рис. 1, б).

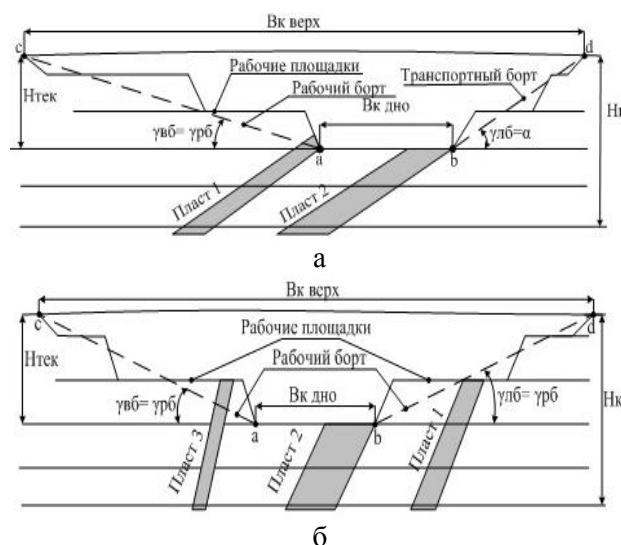


Рис. 1. Упрощенная графическая схема, иллюстрирующая общие принципы формирования выработанного пространства при разработке наклонных пластов по углубочной продольной однобортовой системе разработки (а) и крутопадающих пластов по углубочной продольной двухбортовой системе разработки (б), поперечный профиль

В обобщенном виде параметры бортов для условий разрезов Кемеровской области можно представить следующими параметрическими данными $\gamma_{вб} = \gamma_{рб} = 18-22^\circ$, $\gamma_{лб} = \alpha = 20-40^\circ$ (наклонная залежь) и $\gamma_{вб} = \gamma_{лб} = \gamma_{рб} = 18-22^\circ$ (крутопадающая залежь). Такая параметрическая характеристика специфична только для периода эксплуатации карьерного поля, не находящегося в стадии строительства или затухания горных работ.

В зависимости от конкретных условий эти параметры могут варьироваться. Резюмируя, можно привести цитату акад. В.В. Ржевского [11]: «горные работы должны максимально следовать за залежью полезного ископаемого», тогда вслед за пространственной формой залежи повторяется как форма карьерного поля, так и вместе с тем выработанное пространство.

В действительности же в проектной документации по угольным разрезам Кемеровской области иллюстрационно выработанное пространство угольного разреза зачастую в поперечном сечении изображается как трапецевидная фигура правильной формы, а как исключение в редких случаях показывается продольное сечение выработанного карьерного поля. Фактически из-за этого возникает диспропорциональность баланса долевого размещения вскрышных пород по отвалам угольного разреза, не соблюдается календарный план отсыпки внутреннего отвала и т.д. Следовательно, нужно более дикретно под-

ходить к оценке выработанного пространства на стадии эксплуатации действующего разреза. Затухание горных работ характеризуется тем, что при известных принципах определения конечной глубины карьера [12] горные работы перестают развиваться в плане (достигается равенство текущего и граничного коэффициента вскрыши) и продолжают только по глубине, с формированием бортов погашения карьерного поля, которые могут изменяться от 38 до 45°.

Результаты исследований и обсуждение

Как уже отмечалось выше, по мере развития горных работ как в плане, так и в профиле образовывается выработанное пространство карьерного поля. Разнообразные научно-методические подходы, предлагающие характеристики выработанного пространства, в том числе предшествующие анализу, как уже отмечалось во введении, предложены в трудах [1–9]. Следует подчеркнуть, что пространственно не равномерный характер бортов образует в продольном и поперечном сечении карьерного поля сложные геометрические конфигурации и тогда с учетом анализа отмеченных публикаций ставится задача дать наглядное их представление для условий открытой разработки наклонных и крутопадающих угольных залежей Кемеровской области.

При решении поставленной задачи предлагается графическая схема, которая аккумулирует данные по сечениям выработанного пространства – графическая кумулятивная схема (рис. 2).

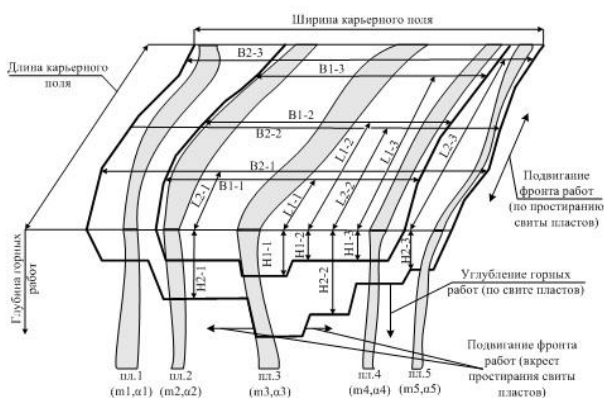


Рис. 2. Графическая кумулятивная схема, поясняющая территориальную неравномерность пространственных сечений карьерного поля на этапах развития рабочей зоны:

- Н1-1, Н1-2, Н1-3 – глубина, фиксирующая положение рабочей зоны на этапе 1;
- L1-1, L1-2, L1-3 – длины фронтов работ на этапе 1 при соответствующей глубине рабочей зоны и ширине; В1-1, В1-2, В1-3 – ширина отрезков; Н2-1, Н2-2, Н2-3, L2-1, L2-2, L2-3, В1-1, В1-2, В1-3 – то же на этапе 2

На рис. 2 показаны в общем виде сечения выработанного пространства при разработке свиты из пяти крутопадающих пластов, пл. 1–5. Каждый угольный пласт из свиты характеризуется параметрами: угол падения ($\alpha 1-\alpha 5$) и мощность ($m 1-m 5$), причем эти параметры характеризуются изменчивостью как по падению, так и по простиранию залежи. Учет неравномерности предлагается через поэтапное развитие рабочей зоны. Например, условно назовем этап 1 и этап 2, эти этапы пространственно фиксируют положение рабочей зоны при развитии горных работ по глубине и в плане. Как показано на графической схеме, на этапе 1 по глубине наибольший отрезок Н1-1, а отрезки Н1-2 и Н1-3 примерно равны, но при этом длина участка L1-1 меньше, чем L1-2 и L1-3, а ширина участка В1-2 больше, чем В1-1 и В1-3. На этапе 2 глубина участков от меньшего к большему Н2-3, Н2-2, Н2-1, и длины участков от меньшего к большему L2-1, L2-2, L2-3, ширина участков от большего к меньшему В2-1, В2-2, В2-3. Можно особо отметить, что подобная параметрическая характеристика свойственна доминирующему большинству угольных разрезов Кемеровской области при разработке свиты наклонных и крутых угольных пластов. Итак, обобщено, обработка карьерного поля всегда неравномерна в своем пространственном развитии.

Тем не менее, основываясь на сравнительном сопоставлении данных проектных организаций ОАО «Кузбасгипрошахт», ООО «Сибгеопроект», ЗАО «Гипроуголь» и фактических накопленных производственным опытом в части графического отображения выработанного пространства за период 2000–2015 гг., могут быть дополнительно получены ранее не идентифицированные пространственные признаки выработанного пространства (в отличие от проектной документации) и уточняющие детали выработанного пространства с целью их последующей реализации в процедурах проектирования объема пород, складываемого в выработанном пространстве. По результатам анализа установлено, что более детализированному описанию поперечных пространственных геометрических форм не уделено достаточного внимания, что может послужить их развитием как для проектной, так и производственной практик.

В авторской интерпретации, предлагающей описание выработанного пространства, обобщающим признаком может быть предложены следующие их геометрические формы в поперечном сечении карьерного поля: V-образные и W-образные. Следует пояснить, что источником возникновения является пространственное положение горизонтальных отрезков, характеризующих дно карьерного поля при углублении горных работ. Согласно

сведениям из нормативного документа «Правила разработки месторождений твердых полезных ископаемых» ширина дна карьерного поля должна быть не менее 30 м. Тогда если в выработанном пространстве при рассмотрении траектории углубления рабочей зоны выявляется на горизонтальной плоскости один участок шириной не менее 30 м, то следует ее относить к “V”, если два или более участков участка, то “W”.

Детализируя эти признаки и руководствуясь данными теоретическими положениями, сечения можно представить в виде идентификации ее геометрической формы за промежуток времени, когда она приобрела свои постоянные и неизменные пространственные очертания. Для дальнейших вычислений обозначим: t – период времени, в течение которого обобщалась и накапливалась информация по параметрам сечений выработанного пространства, T – вид (маркировка) поперечного сечения выработанного пространства (его форма), S – сечение выработанного пространства с постоянством пространственной формы; L, B, H – соответственно длина, ширина и глубина разработки залежи за период анализа.

Следует отметить, что геометрическая форма рабочей зоны исходила из следующих основополагающих моментов: во-первых, привязка и главное направление развития фронта горных работ в карьерном поле; во-вторых, принятый вид системы открытой разработки.

При анализе показателей идентификации выработанного пространства ($t, S=T$) выделено шесть разновидностей сечений выработанного пространства:

1. Треугольная при однобоковой рабочей зоне – (вид Т₀ «Уропско-Караганский» геолого-промышленный район).
2. Трапециевидная при двухбоковой рабочей зоне (вид ТР_д – «Прокопьевско-Кислевский» геолого-промышленный район).
3. Последовательно сдвоенные, строенные (вид ПС – «Кондомский» геолого-промышленный район).
4. Трапециевидная при однобоковой рабочей зоне (ТР_о – «Терсинский» геолого-промышленный район).
5. Линейно-косоугольная (вид ЛК – «Кондомский» геолого-промышленный район).
6. Криволинейно-замкнутая или разомкнутая (вид КЗ – «Бачатский» геолого-промышленный район).

Резюмируя вышеприведенное и прописывая классификационные признаки, в дальнейшем используемые при проектировании, обобщено оценивающие выработанное пространство (ранее не отраженные в научно-технической литературе и проектной документации), могут быть предложены детали, трансформирующие трапециевидную

геометрическую форму выработанного пространства в более разнообразные и в последствии достаточно точно отражающие их фактическое состояние. Иными словами, фактическая идентификация сложной формы выработанного пространства посредством ее замены на простые геометрических отрезки: «рельеф поверхности» – «борт карьера» – «дно» (на **рис. 3** показаны пунктирными линиями).

Применительно к условиям разработки наклонных и крутопадающих залежей Кемеровской области в течение 2000–2015 гг. автором были предложены формы поперечных сечений (Т) и иллюстрационно (см. **рис. 3**) представлена функция диапазона изменения пространственных сечений выработанного пространства (S).

При анализе статистических зависимостей на **рис. 3** установлено следующее. Форма приобретает свои стабильные параметры, когда два или более раз за четыре точки фиксации периода (2000–2005–2010–2015 гг.) показатели пространственного развития рабочей зоны, характеризующие неравномерность сечений выработанного пространства (L, B, H), находились в интервале от 0,95 до 1 (условие соблюдения закономерности [13]). Тогда геометрическую форму поперечного сечения можно считать пространственно устойчивой за период времени. Если показатели (L, B, H) единожды опускались ниже интервала 0,95–1, то необходимо производить дополнительные вычисления для выявления причин снижения пространственной устойчивости. При расчете параметров выработанного пространства, когда расширяются контуры карьерного поля, принимается методическое допущение, предложенное в работе [14]. Размеры выработанного пространства на последующих этапах всегда больше, чем на предыдущем (углубочная система разработки), но в соответствии с условием $S=1$.

Для процедур проектирования и практической реализации можно привести пример сравнительных параметрических характеристик выработанного пространства в части существующего и предлагаемого подходов. К примеру, по «Калтанскому» угольному разрезу («Кондомский» геолого-промышленный район, вид ПС) если брать в расчет правильную трапециевидную форму, то объем выработанного пространства на конец 2015г. в геометрической емкости отвала составляет 47575 тыс. м³, по предлагаемому – 54300 тыс.м³, расхождение примерно 18%. Следовательно, по предлагаемому методическому подходу и его дальнейшей реализации в проектной документации можно откорректировать в сторону увеличения доли вскрышных пород, складываемых в выработанном пространстве карьерного поля угольного разреза, аналогичная ситуация наблюдается и по другим угольным разрезам, используемым при статистическом анализе.

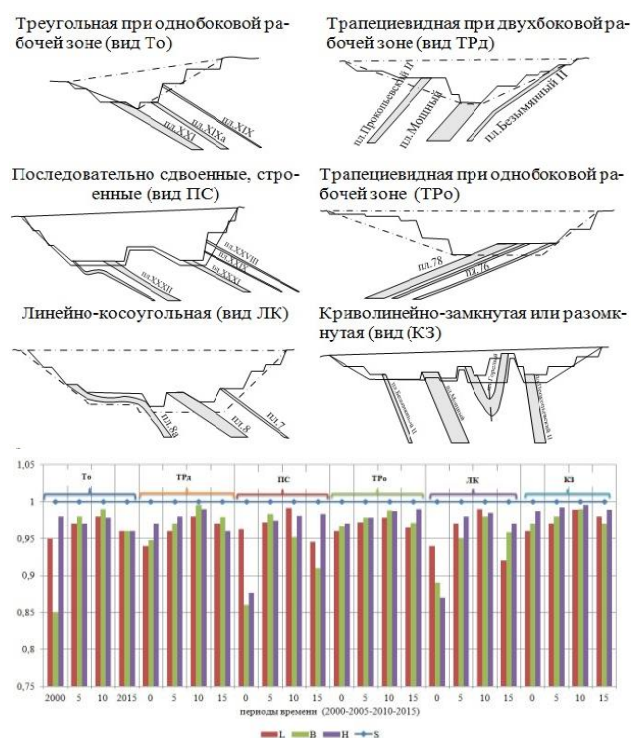


Рис. 3. Графическая интерпретация формы сечения выработанного пространства ($S=T$) от временного фактора (t)

Сформулированные выводы позволяют надеяться, что предлагаемые решения при отработке угольных месторождений наклонного и крутого падения существенно повысят эффективность работы действующих разрезов.

Заключение

Если угольный разрез эксплуатируется несколько десятков лет, то его выработанное пространство следует отождествлять с позиции геометрической формы поперечного сечения. Следовательно, при проектировании карьера предварительно и без трудоемких вычислений можно оценить форму выработанного пространства (при решении задачи в плоскости сечения), а в последующем определить долю пород, которую можно разместить во внутреннем отвале (пространственная задача). Сформулированные автором выводы позволяют надеяться, что предлагаемые решения поставленных технологических и экологических задач горного производства повысят эффективность работы предприятий по добычи угля открытым способом.

Список литературы

1. Определение приемной способности выработанного пространства карьеров при размещении промышленных отвалов различного класса опасности / Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Пыталев И.А., Павлова Е.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. №4. С. 129–133.
2. Зайцева А.А., Зайцев Г.Д. Определение реального выработанного пространства карьеров для внутреннего отвалообразования при разработке наклонных угольных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. №2. С. 129–133.
3. Коваленко В.С., Щтейнцгайг М.Р. Об эффективности использования техногенного ресурса выработанного пространства при углубочно-сплошных системах разработки угольных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 98. С. 211–216.
4. Еременко Е.В., Косолапов А.И. К вопросу управления техногенным ресурсом карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. №114. С. 249–259.
5. Клишин В.И., Ордин А.А., Федорин В.В. Обоснование оптимальной стратегии и оценки предельных объемов добычи угля открытым и подземным способом в Кузбассе // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. №12(2). С. 188–185.
6. Фролов С.В. Анализ научных исследований по вопросам внутреннего отвалообразования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. №12(2). С. 392–396.
7. Селюков А.В. Инструмент корректировки распределения объемов вскрыши по отвалам действующего разреза // Записки горного института. 2016. Т. 219. С. 387–391.
8. Selyukov A.V. Technological significance of internal dumping in open pit coal mining in the Kemerovo region // Journal of Mining Science. 2015, vol. 51, no. 5, pp. 879–887.
9. Selyukov A.V. Advanced technology based on new technological and organization principles of spatial development of front of mining operation at open pits // Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control «Chinese coal in XXI century: mining, green and safety», 17–20 October 2014. Qindao, China, pp. 156–160.
10. Ржевский В. В. Открытые горные работы: Технология и комплексная механизация. М.: Недра, 1985. 549 с.
11. Ржевский В. В. Проектирование контуров карьеров. М.: Металлургиздат, 1957. 281 с.
12. Хохряков В.С. Проектирование карьеров: учебник для вузов. М.: Недра, 1992. 383 с.
13. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
14. Селюков А. В. Контурное развитие карьерного поля и внешнего отвала в задачах сокращения избыточного выработанного пространства разрезов с автотранспортной технологией // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. №4. С. 43–45.

Поступила 28.12.16.

Принята в печать 07.06.17.

THE MINED-OUT SPACE OF COAL PITS: DEVELOPMENT OF CLASSIFICATION FEATURES

Aleksey V. Selyukov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia. E-mail: alex-sav@rambler.ru

Abstract

Kuzbass is one of the largest developed coal basins of the Russian Federation, with most of the strippable coal contained in inclined and steeply inclined coal seams. The commonly used deepening longitudinal one-board or two-board mining system contributes to the progressing rate of surface deterioration caused by both mining operations and external dumping. The land capacity in the Kemerovo Region is 3 to 4 times higher than the indicators shown by the other basins found in the country. The environmental impact can be reduced by changing the mining sequence, i.e. by using the mined-out space for overburden. If such usage is overlooked at the mine site design stage, the open-pit fields will be limited with their own overburden dumps, which may impede their further development. These solutions are designed to help eliminate the above mentioned shortcomings of the deepening mining systems. Besides, the general technical policy of coal producers includes a consistent trend for an increased share of internal dumping. The mined-out space, which was earlier considered unavailable for overburden during either the initial or actual operating period, can be efficiently utilized by way of targeted impacts. As a coal mine gets developed, the mined-out space offers spatial figures confined between two surfaces – the natural one and the man-made one. Contrary to contemporary literature sources, which are analyzed in the publication, the author's interpretation of classification features is the first of its kind that allows for the spatial geometrical forms of sections of the mined-out space. Regularities have been identified following a statistical analysis of the technical data collected from the coal mines of the Kemerovo Region. The established regularities can help identify the spatial consistency of the geometrical forms of the mined-out space. The dependences obtained can be used for designing internal overburden dumps.

Keywords: Open pit, mined-out space, spatial form, indicators, regularities.

References

- Gavrishev S.E., Zalyadnov V.Yu., Pytalev I.A., Pavlova E.V. Determining the capacity of the mined-out space of open pits to be used for various types of hazardous waste. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining bulletin], 2014, no. 4, pp. 129–133. (In Russ.)
- Zaytseva A.A., Zaytsev G.D. Determining the actual mined-out space of open pits for internal dumping when developing inclined coal deposits. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining bulletin], 2011, no. 2, pp. 129–133. (In Russ.)
- Kovalenko V.S., Shchteyntsayg M.R. On efficiency of using the mined-out space in longwall coal mining. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining bulletin], 2009, no. 98, pp. 211–216. (In Russ.)
- Eremenko E.V., Kosolapov A.I. On management of the man-made resources of an open pit. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining bulletin], 2015, no. 114, pp. 249–259. (In Russ.)
- Klishin V.I., Ordin A.A., Fedorin V.V. Substation of optimum strategy and assessment of maximum coal production through open-pit and underground mining in Kuzbass. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining bulletin], 2009, no. 12(2), pp. 188–185. (In Russ.)
- Frolov S.V. Analysis of research papers concerned with internal dumps. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining bulletin], 2009, no. 12(2), pp. 392–396. (In Russ.)
- Selyukov A.V. Overburden placement optimization tool for an operating pit. *Zapiski gornogo instituta* [Proceedings of the mining institute], 2016, vol. 219, pp. 387–391. (In Russ.)
- Selyukov A.V. Technological significance of internal dumping in open pit coal mining in the Kemerovo region [Journal of Mining Science]. 2015, vol. 51, no. 5, pp. 879–887.
- Selyukov A.V. Advanced technology based on new technological and organization principles of spatial development of front of mining operation at open pits. Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control "Chinese coal in XXI century: mining, green and safety", 17–20 October 2014. Qindao, China, pp. 156–160.
- Rzhevskii V.V. *Otrytye gornye raboty: Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizatsiya* [Opencast mining: Technology and comprehensive mechanization]. Moscow: Nedra, 1985, 549 p. (In Russ.)
- Rzhevskii V.V. *Proektirovanie konturov karierov* [Pit outline design]. Moscow: Metallurgizdat, 1957, 281 p. (In Russ.)
- Khokhryakov V.S. *Proektirovanie karierov: uchebnik dlya vuzov* [Open pit design: Textbook for university students]. Moscow: Nedra, 1992, 383 p. (In Russ.)
- Zaks L. *Statisticheskoe otsenivanie* [Statistical estimation]. Moscow: Statistics, 1976, 598 p. (In Russ.)
- Selyukov A.V. Contouring of an open pit field and an external dump with the aim of reducing excessive mined-out space at open pit mines relying on haulage trucks. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2016, no. 4, pp. 7–13. (In Russ.)

Received 28/12/16
Accepted 07/06/17

Образец для цитирования

Селюков А.В. Выработанное пространство угольных разрезов: развитие классификационных признаков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 12–17. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-12-17>

For citation

Selyukov A.V. The mined-out space of coal pits: development of classification features. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 12–17. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-12-17>

СПОСОБ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ МАЛОМАСШТАБНЫХ КРУТОПАДАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Чебан А.Ю.

Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук РАН (ИГД ДВО РАН), Хабаровск, Россия

Аннотация

Минерально-сырьевой комплекс является важной составляющей экономики России. При добыче твердых полезных ископаемых наибольшее распространение получил открытый способ разработки месторождений. С увеличением глубины крупных карьеров затраты на добычу минерального сырья непрерывно возрастают. В связи с постепенным истощением минерально-сырьевой базы крупных месторождений твердых полезных ископаемых все больший интерес для горнодобывающих предприятий начинают представлять маломасштабные месторождения. Достоинствами многих из них является богатое содержание полезных компонентов в руде и небольшая глубина ее залегания, совокупные минерально-сырьевые ресурсы таких месторождений довольно значительны. В то же время многие маломасштабные месторождения пространственно удалены друг от друга и от крупных горнодобывающих предприятий и труднодоступны, что ведет к значительным затратам при их освоении. В последние годы на горные предприятия поступает новая высокопроизводительная техника непрерывного действия, позволяющая вести безвзрывную выемку прочных пород. Для доработки запасов карьерных полей месторождений в России начали применять комплексы глубокой разработки пластов, однако данное оборудование не позволяет разрабатывать крутопадающие рудные тела. В статье предлагается способ разработки крутопадающих месторождений и автоматизированный комплекс глубокой разработки для его осуществления. Комплекс включает колесное шасси повышенной проходимости, фрезерный рабочий орган, установленный на телескопической стреле, систему пневматического транспортирования горной массы из забоя и другое оборудование. В сравнении традиционными способами освоения крутопадающих рудных тел, предлагаемое решение позволяет снизить количество горнодобывающего оборудования и производственного персонала и повысить безопасность ведения горных работ.

Ключевые слова: комплекс глубокой разработки, рудное тело, горная масса, пневмотранспортная система, автосамосвал.

Введение

Минерально-сырьевой комплекс является важнейшей составляющей экономики России, а реализация минеральных ресурсов за рубеж обеспечивает основную долю валютных поступлений в страну [1]. В связи с постепенным истощением минерально-сырьевой базы крупных месторождений твердых полезных ископаемых все больший интерес для горнодобывающих предприятий начинают представлять маломасштабные месторождения [2]. Кроме того, необходимо отметить, что с увеличением глубины крупных карьеров непрерывно возрастает коэффициент вскрыши и объемы пустых пород, перемещаемых в отвалы, затраты на транспортировку горной массы также увеличиваются и в отдельных случаях могут достигать 65–75% всех затрат на добычу полезного ископаемого [3]. Усложняются схемы карьерного транспорта, начинают использоваться комбинированные схемы с применением различных видов конвейеров и подъемников, дробильно-перегрузочных установок и другого оборудования [4–9].

Достоинствами многих маломасштабных месторождений является богатое содержание полезных компонентов в руде и небольшая глубина ее залегания [2], совокупные минерально-сырьевые ресурсы таких месторождений довольно значительны, так как по разным оценкам на одно крупное месторождение приходится от 10 до 90 маломасштабных. К недостаткам можно отнести пространственную удаленность многих маломасштабных месторождений друг от друга и от крупных горнодобывающих предприятий, труднодоступность, что ведет к значительным затратам при освоении данных месторождений.

Постановка проблемы

В настоящее время в горном производстве появляется новая высокопроизводительная техника непрерывного действия, позволяющая вести безвзрывную выемку плотных, полускальных и легко разрабатываемых скальных пород [10–15]. В горное производство в России и за рубежом внедряются комплексы глубокой разработки пластов (КГРП), предназначенные, прежде всего, для доработки запасов карьерных полей угольных месторождений [16–17]. Ком-

плекс глубокой разработки пластов представляет собой комбайн с дистанционно управляемым рабочим органом, внедряемым в пласт с помощью упорных усилий конвейера, последовательно наращиваемого по мере углубления и образующего единый став между поверхностным и выемочным модулями. Применение известных конструкций КГРП для разработки наклонных и крутонаклонных маломасштабных месторождений полезных ископаемых невозможно в связи с тем, что транспортировка горной массы конвейерным станом КГРП не превышает 18–20°.

Известны конструкции фрезерных устройств, позволяющие создавать вертикальные выемки с целью возведения в массиве вертикальных стен [18]. Дисковые фрезы разрабатывают породу, а измельченная горная масса удаляется всасывающей системой пневмотранспортирования. Данные конструкции не позволяют разрабатывать наклонные выемки и прочные горные породы, поскольку фрезы подвешены на канатах и напор на забой осуществляется только за счет собственного веса рабочего органа.

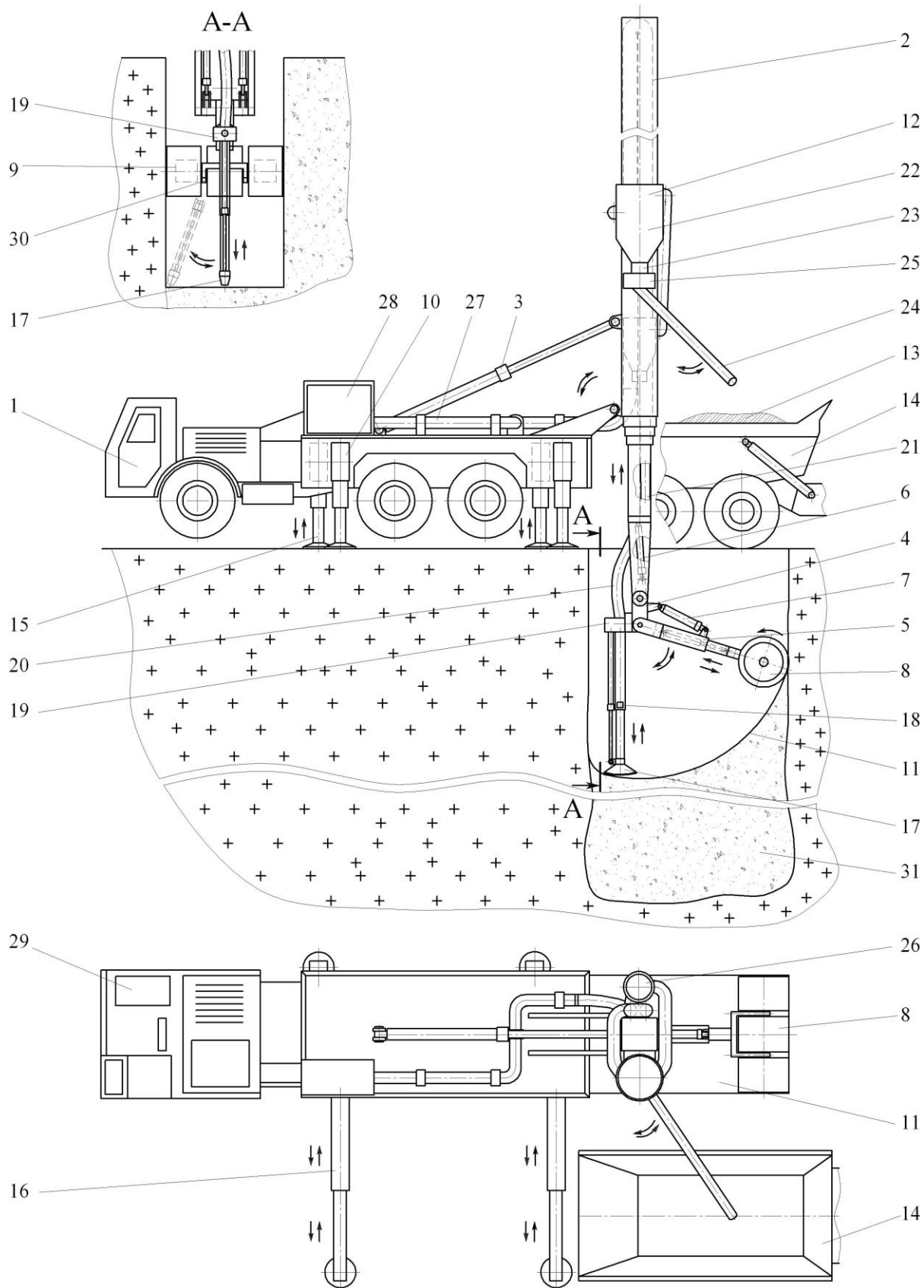
Результаты исследований и их обсуждение

В Институте горного дела ДВО РАН разработан и запатентован способ освоения маломасштабных крутопадающих месторождений и автоматизированный комплекс глубокой разработки для осуществления данного способа [19]. Автоматизированный комплекс включает колесное шасси 1 повышенной проходимости, телескопическую стрелу 2 с механизмом подъема 3, промежуточную 4 и телескопическую головную 5 секции с механизмами поворота 6 и 7 (см. рисунок).

Также имеется составной рабочий орган 8 со встроенным механизмом вращения 9, механизм позиционирования 10 комплекса относительно забоя 11 и вакуумная система пневмотранспортирования 12 горной массы 13 из забоя в автосамосвал 14. Механизм позиционирования комплекса состоит из выдвижных опор 15 и направляющих 16. Вакуумная система пневмотранспортирования 12 включает телескопическое сопло 17 с датчиками 18 контроля контуров горной массы в забое, механизм поворота сопла 19, гибкие шланги 20 и телескопический трубопровод 21, разгрузатель 22, затвор 23, разгрузочный желоб 24 с механизмом поворота 25, фильтр 26, стационарные трубопроводы 27 и воздушный насос 28. Управление работой комплекса осуществляется с использованием системного блока

управления 29. Комплекс оборудован системой распознавания слоев с датчиками 30 контроля физико-механических характеристик горных пород, связанными с системным блоком управления 29 автоматизированным комплексом глубокой разработки.

Освоение маломощного крутопадающего месторождения с помощью комплекса глубокой разработки ведется следующим образом. На основании геологоразведочных данных комплекс позиционируется с учетом направления залегания рудного тела 31. Приведение автоматизированного комплекса глубокой разработки в рабочее исходное состояние осуществляется посредством выдвижения направляющих 16 и выносных опор 15. С помощью механизма поворота 3 производится подъем телескопической стрелы 2 с промежуточной 4 и телескопической головной 5 секциями. Телескопическая стрела 2 выдвигается до контакта рабочего органа 8 с горным массивом, начинается отработка рудного тела 31. С учетом физико-механических характеристик разрабатываемой горной породы, системный блок управления 29 в автоматическом режиме устанавливает рациональный режим функционирования рабочего органа 8 (частоту вращения, величину напора, глубину резания, скорости перемещения в забое). После разрушения горная масса 13 смещается в нижнюю часть забоя 11, где располагается телескопически подвижное сопло 17, установленное с возможностью поворота в вертикальной плоскости. Информация о контурах разрушенной горной массы поступает от датчиков 18 на системный блок управления 29, который задает рациональную траекторию перемещения сопла 17 для удаления горной массы из забоя 11. При включении воздушного насоса 28 осуществляется всасывание частиц горной массы через сопло 17, гибкий шланг 20 и телескопический трубопровод 21. Затем частицы горной массы подаются к разгрузателю 22, в нижней части которого имеется затвор 23, при открытии затвора 23 горная масса по разгрузочному желобу 24 поступает в автосамосвал 14. Равномерная загрузка кузова автосамосвала обеспечивается путем перемещения разгрузочного желоба 24 посредством механизма поворота 25. С помощью датчиков 30 системы распознавания слоев перемещение рабочего органа 8 ограничивается лишь контуром рудного тела 31.



Общий вид автоматизированного комплекса глубокой разработки маломасштабных месторождений в рабочем положении

После отработки элемента рудного тела 31 на определенную глубину рабочий орган 8 поднимается на дневную поверхность и автоматизированный комплекс глубокой разработки без переустановки опор 15 на направляющих 16 смещается вдоль залегания рудного тела. Таким образом, с одной установки комплекс может отработать забой длиной, равной 2–3 ширины рабочего органа, что значительно сокращает время на маневрирование комплекса. В транспортное положение рабочий орган 8, промежуточная секция 4, телескопическая головная секция 5 и сопло 17 устанавливаются с помощью механизма поворота 6.

Выводы

Предлагаемое оборудование расширяет технологическую эффективность разрушения пород различной степени крепости и связности посредством регулирования усилия резания в зоне обработки и формирования в поверхностном слое обрабатываемого массива зон разрушения с учетом прочностных характеристик породы [20]. Способ разработки маломасштабных месторождений и автоматизированный комплекс глубокой разработки в сравнении с традиционными способами освоения крутопадающих рудных тел позволяет снизить количество горнодобывающего оборудования и производственного персонала и повысить безопасность ведения горных работ. Применение комплекса также обеспечивает минимально возможный коэффициент вскрыши при открытой разработке подобных месторождений.

Список литературы

- Мельников Н.Н., Бусырев В.М. Концепция ресурсосбалансированного освоения минерально-сырьевой базы // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2005. №2. С. 58–64.
- Готов В.В. Об инвестиционной привлекательности мелких месторождений полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. №10. С. 101–104.
- Ржевский В.В. Открытые горные работы. Ч. I. Производственные процессы: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1985. 509 с.
- Гавришев С.Е., Бурмистров К.В., Кидяев В.А. Использование преимуществ карьерного комбинированного транспорта при открыто-подземной разработке месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №3. С. 5–7.
- Трубецкой К.Н., Корнилков С.В., Яковлев В.Л. О новых подходах к обеспечению устойчивого развития горного производства // Горный журнал. 2012. №1. С. 15–19.
- Осадчий В.И., Маулямбаев Т.И., Кузьмин С.Л. Проектирование технологии обмена контейнеров на подъемных пунктах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №2. С. 16–18.
- Чебан А.Ю., Хрунина Н.П. Модернизация транспортно-перегрузочного оборудования при ведении открытых горных работ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 10–14.
- Special equipment for quarry operations. *Zement-Kalk-Gips Int.* 2014, vol. 67, no. 10, p. 12.
- Mobil Anlagen von Sandvik in Kasachstan. *AT Miner. Process. Eur.* 2015, vol. 56, no. 1–2, pp. 40–41.
- Чебан А.Ю. Совершенствование безвзрывных циклично-поточных технологий добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №2. С. 5–9.
- Чебан А.Ю. Классификация технологических схем применения карьерных комбайнов // Системы. Методы. Технологии. 2015. №2. С. 159–163.
- Швабенланд Е.Е., Соколовский А.В., Пихлер М. Выбор параметров послойно-порционной технологии при разработке сложноструктурных месторождений комбайнами фрезерного типа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №1. С. 5–11.
- Решетняк С.П., Аврамова Н.С. Развитие техники и технологии безвзрывной разработки горных пород на карьерах // Горная техника. 2012. №1. С. 2–8.
- Чебан А.Ю. Совершенствование технологий открытой разработки месторождений с использованием карьерных комбайнов и отвалообразователей // Записки горного института. 2015. Т. 214. С. 23–27.
- Wirtgen surface mining for selective limestone mining in the North Caucasus / Russia. *Zement-Kalk-Gips Int.* 2014, vol. 67, no. 10, p. 18.
- Ромашкин Ю.В. Доработка запасов карьерных полей угольных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. №10. С. 70–74.
- Задавин Г.Д., Лейдерман Л.П. Освоение Элегестского каменноугольного месторождения – основа создания новой сырьевой базы коксующихся углей // Рациональное освоение недр. 2012. №2. С. 38–44.
- Пат. 2310725, E02F 5/08 (DE), E02F 5/20. Фрезерное устройство и способ разработки грунта / Штетцер Э.
- Пат. 2541992 РФ, E21C 41/26, E21C 35/24, E21C 27/24. Способ разработки крутопадающих месторождений твердых полезных ископаемых и автоматизированный комплекс глубокой разработки / А.Ю. Чебан.
- Cheban A.Yu., Sekisov G.V., Khrunina N.P., Shemyakin S.A. Upgrading continuous and cyclic excavation and transportation during open-pit mining // *Eurasian mining.* 2014. №1. pp. 22–24.

Поступила 05.04.17.

Принята в печать 07.06.17.

METHOD AND EQUIPMENT FOR OPENCAST MINING OF SMALL STEEPLY DIPPING DEPOSITS

Anton Yu. Cheban – Senior Researcher, Associate Professor

Institute of Mining of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia. E-mail: chebanay@mail.ru

Abstract

Mineral resources are an important sector of the Russian economy. Opencast mining is the most popular method for extracting solid minerals. Further development of large-scale open pits depthwise is associated with ever-rising mining costs. Due to a gradual depletion of large-scale solid mineral deposits, small-scale deposits are gaining an increasing popularity among mining companies. The benefits offered by many of such deposits include a high concentration of valuable components and a small depth of their occurrence. They offer an overall significant amount of resources. At the same time, many small-scale deposits are scattered far from each other or from big mining sites and are not easily accessible, which may lead to significant development costs. In recent years, the mining companies have been buying new high-performance continuous mining equipment enabling them to mine hard ores in an explosive-free way. To complete the extraction of open pit fields, the Russian mine operators started to deploy highwall mining systems. However, highwall mining systems are not applicable to steeply dipping ore bodies. The author of this article proposes a method for mining steeply dipping deposits, as well as an automated longwall mining system. The longwall mining system comprises a heavy-duty wheel undercarriage, a cutter mounted on a telescopic boom, a pneumatic transport system and other components. The highwall mining system ensures high efficiency and safety of mining operations, as well as a significant reduction in overburden removal and environmental impact.

Keywords: Highwall mining system, ore body, rock mass, pneumatic transport system, dump truck.

References

1. Melnikov N.N., Busyrev V.M. Sustainable mineral resources development strategy. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2005, no. 2, pp. 58–64. (In Russ.)
2. Glotov V.V. On investment attractiveness of small mineral deposits. *Gornyj informatsionno-analiticheskij bjulleten'* [Mining Bulletin], 2003, no. 10, pp. 101–104. (In Russ.)
3. Rzhavskiy V.V. *Otkrytye gomnye raboty. Chast' I. Proizvodstvennyye protsessy: Uchebnik dlya vuzov* [Open pit mining. Part I. Production processes: Textbook for universities]. 4th revised edition. Moscow: Nedra, 1985, 509 p. (In Russ.)
4. Gavrishov S.E., Burmistrov K.V., Kidyayev V.A. Exploiting the advantages of combined open-pit transport in combined open cut and underground mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2010, no. 3, pp. 5–7. (In Russ.)
5. Trubetskoy K.N., Komilkov S.V., Yakovlev V.L. On new strategies of ensuring sustainable development of mining operations. *Gornyj zhurnal* [Mining Journal], 2012, no. 1, pp. 15–19. (In Russ.)
6. Osadchiy V.I., Maulyanbaev T.I., Kuzmin S.L. Designing a container exchange system to be used at lifting points. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 2, pp. 16–18. (In Russ.)
7. Cheban A.Yu., Khrunina N.P. Enhanced transportation and handling equipment in opencast mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 1, pp. 10–14. (In Russ.)
8. Special equipment for quarry operations. *Zement-Kalk-Gips Int.* 2014, vol. 67, no. 10, p. 12.
9. Mobil Anlagen von Sandvik in Kasachstan. *AT Miner. Process. Eur.* 2015, vol. 56, no. 1–2, pp. 40–41.
10. Cheban A.Yu. Enhancing the conveying technology in explosive-free mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 2, pp. 5–9. (In Russ.)
11. Cheban A.Yu. Classification of surface miner utilization schemes. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2015, no. 2, pp. 159–163. (In Russ.)
12. Schwabenland E.E., Sokolovskiy A.V., Pikhler M. Selecting the parameters of the layer-batch process when using cutters for mining structurally complex deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 1, pp. 5–11. (In Russ.)
13. Reshetnyak S.P., Avramova N.S. Development of explosive-free mining machinery and technology for open pits. *Gornaya tekhnika* [Mining machinery], 2012, no. 1, pp. 2–8. (In Russ.)

14. Cheban A.Yu. Opencast mining systems enhanced with surface miners and spreaders. *Zapiski gornogo instituta* [Proceedings of Mining Institute], 2015, vol. 214, pp. 23–27. (In Russ.)
15. Wirtgen surface mining for selective limestone mining in the North Caucasus / Russia. *Zement-Kalk-Gips Int.* 2014, vol. 67, no. 10, p. 18.
16. Romashkin Yu.V. Final extraction of coal fields. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Bulletin], 2012, no. 10, pp. 70–74. (In Russ.)
17. Zadavin G.D., Leiderman L.P. The development of the Elegest coal deposit as the basis for building a new coking coal stock. *Ratsional'noe osvoenie nedr* [Mineral mining and conservation], 2012, no. 2, pp. 38–44. (In Russ.)
18. Stetzer E. Milling device and an excavation method. Patent DE, no. 2310725, 2007.
19. Cheban A. *Sposob razrabotki krutopadayushchikh mestorozhdeniy tverdykh poleznykh iskopaemykh i avtomatizirovannyi kompleks grubokoy razrabotki* [Mining method for steeply dipping solid mineral deposits and an automated highwall mining system]. Patent RF, no. 2541992.
20. Cheban A.Yu. On determining the capacity of surface miners under various operating conditions. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2014, no 3, pp. 145–148. (In Russ.)

Received 05/04/17

Accepted 07/06/17

Образец для цитирования

Чебан А.Ю. Способ и оборудование для открытой разработки маломасштабных крутопадающих месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 18–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-18-23>

For citation

Cheban A.Yu. Method and equipment for opencast mining of small steeply dipping deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 18–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-18-23>

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.053:669.4:669.431.22

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-24-30>

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАВКИ СВИНЦОВОГО КЕКА

Мальцев Г.И., Тимофеев К.Л., Попов А.И.

АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): статья посвящена вопросу создания экологически безопасной, технологически эффективной и экономически выгодной высокопроизводительной схемы по переработке свинецсодержащих промпродуктов и отходов. На примере пирометаллургической технологии восстановительной плавки свинцового кека (~35% Pb) и силикатного шлака (~22% Pb) сформулированы актуальные проблемы оптимизации традиционных методов комплексной переработки полиметаллических отходов и промпродуктов с переводом цветных металлов в товарные продукты посредством компьютерного моделирования. **Цель работы:** изучение зависимостей фазового состава и распределения элементов по продуктам плавки от содержания компонентов исходной шихты, а также возможности термодинамического прогнозирования оптимального состава шихты для восстановительной плавки свинцового кека ОАО «Электроцинк» (г. Владикавказ) и силикатного шлака. **Используемые методы:** с помощью программного пакета “Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry” выполнены балансовые расчеты многокомпонентных составов равновесия в гетерофазной системе «газ–жидкость–твердое» при восстановительной плавке свинцового кека и силикатного шлака. **Новизна:** к элементам новизны относится одновременная плавка свинцового кека и силикатного шлака, а также использование в качестве восстановителей, наряду с коксом, металлической стружки и железной руды, что сделало возможным утилизацию техногенных отходов. **Результат:** в процессе восстановительной плавки в газовую фазу переходит преимущественно цинк, а в составе металлической фазы концентрируются свинец, медь и сурьма. При оптимальном составе шихты (67% – свинцовый кек; 9% – шлак силикатный; 2% – стружка железная; 3% – известняк; 12% – кокс) практически полностью переходят в металлическую фазу свинец, медь (>99%), большая часть сурьмы (>88%) и мышьяка (>78%); цинк распределяется между газовой (~67%) и шпейзо-шлаковой (~31%) фазами вместе с окисленным железом (~54%). **Практическая значимость:** получены исходные данные для оптимизации режима восстановительной плавки полиметаллических отходов и промпродуктов, что позволит расширить номенклатуру материалов, содержащих свинец, для комплексной пирометаллургической переработки с получением товарных продуктов цветных металлов.

Ключевые слова: плавка, кек, шихта, возгоны, шлак, штейн, металл, свинец.

Введение

На медеплавильных предприятиях в техногенных отходах содержатся значительные количества цветных и токсичных металлов. Metallургические пыли с высоким содержанием свинца и цинка подвергают сернокислотному выщелачиванию: из растворов получают цинк или его соли; в кеках концентрируют свинец и олово [1–3]. Разработан ряд схем и технологий переработки свинецсодержащих промпродуктов, однако они не нашли широкого промышленного применения, в результате чего проис-

ходит накопление свинецсодержащих отходов. Актуальным является вопрос о создании экологически безопасной, технологически эффективной и экономически выгодной высокопроизводительной схемы по переработке свинецсодержащих промпродуктов и отходов [4–6]. Технологические и экологические недостатки пирометаллургической схемы определяют необходимость ее оптимизации для комплексной переработки полиметаллических отходов и промпродуктов с извлечением свинца [7–9].

Целью работы является изучение зависимостей фазового состава и распределения элементов по продуктам плавки от содержания компо-

© Мальцев Г.И., Тимофеев К.Л., Попов А.И., 2017

нентов исходной шихты, а также возможности термодинамического прогнозирования оптимального состава шихты для восстановительной плавки свинцового кека (35,6% Pb) ОАО «Электроцинк» (г. Владикавказ) с фазовым составом, мас. %: 45,84 – PbCO₃; 6,84 – ZnS; 5,2 – ZnOFe₂O₃; 3,1 – SnO; 2,28 – Fe₂O₃; 2,8 – SiO₂; 1,7 – CaO; 1,6 – As₂O₃; 1,1 – Sb₂O₃; 0,6 – CuO, и силикатного шлака (22,5% Pb) плавки медеэлектролитного шлака АО «Уралэлектромедь» с фазовым составом, мас. %: 30,0 – SiO₂; 24,24 – PbO; 23,58 – Sb₂O₃; 3,3 – CaO; 1,43 – Fe₂O₃; 0,79 – As₂O₃; 0,75 – CuO, для максимального перевода свинца в металлическую фазу.

Методика исследований

Для переработки образующихся свинецсодержащих промпродуктов в филиале АО «Уралэлектромедь» «Производство сплавов цветных металлов» (ПСЦМ г. Верх-Нейвинск) специалистами комбината предварительно был предложен следующий годовой состав шихты, т(сух)/мас. %: 600,0/8,7 – шлак силикатный;

4639,0/67,2 – кек свинцовый; 262,6/3,8 – лигносульфонат; 189,8/2,7 – руда железная; 157,0/2,3 – стружка железная; 209,8/3,0 – известняк; 844,1/12,2 – кокс. В результате ожидали получить следующие продукты плавки при 1200°C, т/мас. %: 1844,8/26,7 – свинец черновой; 1828,5/26,5 – шлак; 449,4/6,5 – возгоны (табл. 1). Предстояло выявить влияние отдельных компонентов шихты на состав и количество продуктов восстановительной плавки свинцового кека и силикатного шлака. При выполнении балансовых расчетов многокомпонентных составов равновесия в гетерофазной системе «газ–жидкость–твердое» использовали функцию «Equilibrium Composition» программы «Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry» [10–13]. За основу в качестве базового варианта была взята шихтовка, предложенная специалистами ОАО «Электроцинк», с соответствующим содержанием, т: 810,3 – C; 149,2 – Fe; 115,9 – FeO; 110,2 – CaO, которому соответствуют единичные коэффициенты массы ($K_{C, Fe, FeO, CaO} = 1,0$).

Таблица 1

Состав компонентов шихты и продуктов плавки, т/мас. %

Материал	Pb	Cu	Zn	As	Sn	Sb
Поступило						
Шлак силикатный	135,0/22,5	3,7/0,6	–	3,4/0,6	–	118,4/19,7
Кек свинцовый	1649,2/35,6	23,2/0,5	278,3/6,0	55,8/1,2	125,9/2,7	39,4/0,9
Получено						
Свинец черновой	1595,0/86,5	23,6/1,3	0,8/0,05	23,7/1,3	89,4/4,8	126,3/6,8
Шлак	44,6/2,4	1,6/0,1	77,9/4,3	13,6/0,7	29,0/1,6	18,9/1,0
Возгоны	135,6/30,2	1,4/0,3	194,8/43,4	21,3/4,7	6,7/1,5	11,4/2,5
Материал	Fe	Bi	SiO ₂	CaO	Au, кг/гТ ⁻¹	Ag
Поступило						
Шлак силикатный	6,0/1,0	–	180,0/30,0	19,5/3,3	15,8/26,3	1,95/0,32
Кек свинцовый	185,6/4,0	7,0/0,2	128,5/2,8	78,9/1,7	3,3/0,7	0,55/0,01
Руда железная	90,1/47,5	–	4,4/2,3	4,9/2,6	–	–
Стружка железная	149,2/95,0	–	–	–	–	–
Известняк	0,5/0,2	–	2,9/1,4	110,2/52,5	–	–
Кокс	12,7/1,5	–	64,6/7,7	4,5/0,5	–	–
Получено						
Свинец черновой	–	6,3/0,3	–	–	18,1/9,8	2,37/0,13
Шлак	417,4/22,8	0,5/<0,01	357,5/19,6	204,9/11,2	0,4/0,2	0,05/<0,01
Возгоны	22,2/4,9	0,1/<0,01	21,7/4,8	12,2/2,7	0,4/0,8	0,05/0,011

Результаты и их обсуждение

При выполнении термодинамических расчетов равновесных систем продуктов плавки изменяли исходное содержание указанных соединений и элементов в следующих пределах:

- углерод 444–1150 т ($K_C = 0,55–1,42$);
- железо 70,5–246 т ($K_{Fe} = 0,47–1,65$);
- оксид железа 57,5–158 т ($K_{FeO} = 0,64–1,75$);
- оксид кальция 100–278 т ($K_{CaO} = 0,46–1,28$).

Значения степени перехода элементов из состава исходной шихты в продукты плавки от содержания углерода в шихте по программе «Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry» в сравнении с данными предварительного расчета (прогноз) представлены в табл. 2–3.

Таблица 2

Распределение элементов (%) в возгоны и шлаковую фазу от содержания углерода

K_C	C, %	Pb	Sb	Sn	Zn	Sn	Fe
		Возгоны			Шлак		
0,548	94,4	0,14	100	1,24	42,9	98,76	3,78
0,671	77,6	0,13	100	1,27	35,9	98,73	2,88
0,796	65,86	0,12	100	1,30	30,7	98,7	2,32
0,919	57,2	0,116	100	1,32	26,8	98,68	1,95
1,043	50,6	0,112	100	1,34	23,6	98,66	1,68
1,166	45,3	0,109	100	1,35	21,1	98,65	1,47
1,283	41,05	0,107	100	1,36	19,1	98,64	1,31
1,419	37,5	0,105	100	1,37	17,4	98,63	1,18
Прогноз	50	7,6	7,2	5,3	28,0	23,0	95,0

Таблица 3

Распределение элементов (%) в штейновую и металлическую фазы от содержания углерода

K_C	C, %	Fe	Zn	Fe	Pb	Zn	Cu	Bi
		Штейн		Металл				
0,548	94,4	12,00	20,42	84,22	99,86	36,68	100	100
0,671	77,6	11,96	20,53	85,16	99,87	43,57	100	100
0,796	65,86	11,93	20,60	85,75	99,88	48,7	100	100
0,919	57,2	11,91	20,65	86,14	99,84	52,55	100	100
1,043	50,6	11,90	20,68	86,42	99,88	55,72	100	100
1,166	45,3	11,89	20,71	86,64	99,891	58,19	100	100
1,283	41,05	11,88	20,73	86,81	99,893	60,17	100	100
1,419	37,5	11,87	20,74	86,95	99,895	61,86	100	100
Прогноз	50	–	70,0	–	89,4	0,3	88	90

Определены количественный и фазовый состав продуктов плавки для базового варианта шихтовки, т / мас. %:

- возгоны (1934,22/100): 1560/80,65 CO₂; 370/19,13 SbO; 2,31/0,12 PbS; 1,91/0,1 SnO;
- шлаковая фаза (280,4/100): 146/52,07 SnO; 51/18,19 ZnO; 49,9/17,8 Zn₂SiO₄; 22,1/7,88 ZnSiO₃; 9,25/3,3 FeO; 0,46/0,16 2FeO·SiO₂; 1,69/0,6 SnO₂;
- штейновая фаза (276,55/100): 85,8/31,03 ZnS; 188/67,98 FeAs₂; 2,75/0,99 FeS;
- металлическая (элементная) фаза (3542,29/100): 648/18,29 C; 606/17,1 Fe; 1920/54,2 Pb; 320/9,03 Zn; 39,3/1,11 Cu; 8,99/0,25 Bi.

Зависимость фазового состава продуктов плавки от содержания углерода в шихте представлена на рисунке.

После выполнения расчетов выявлены следующие зависимости:

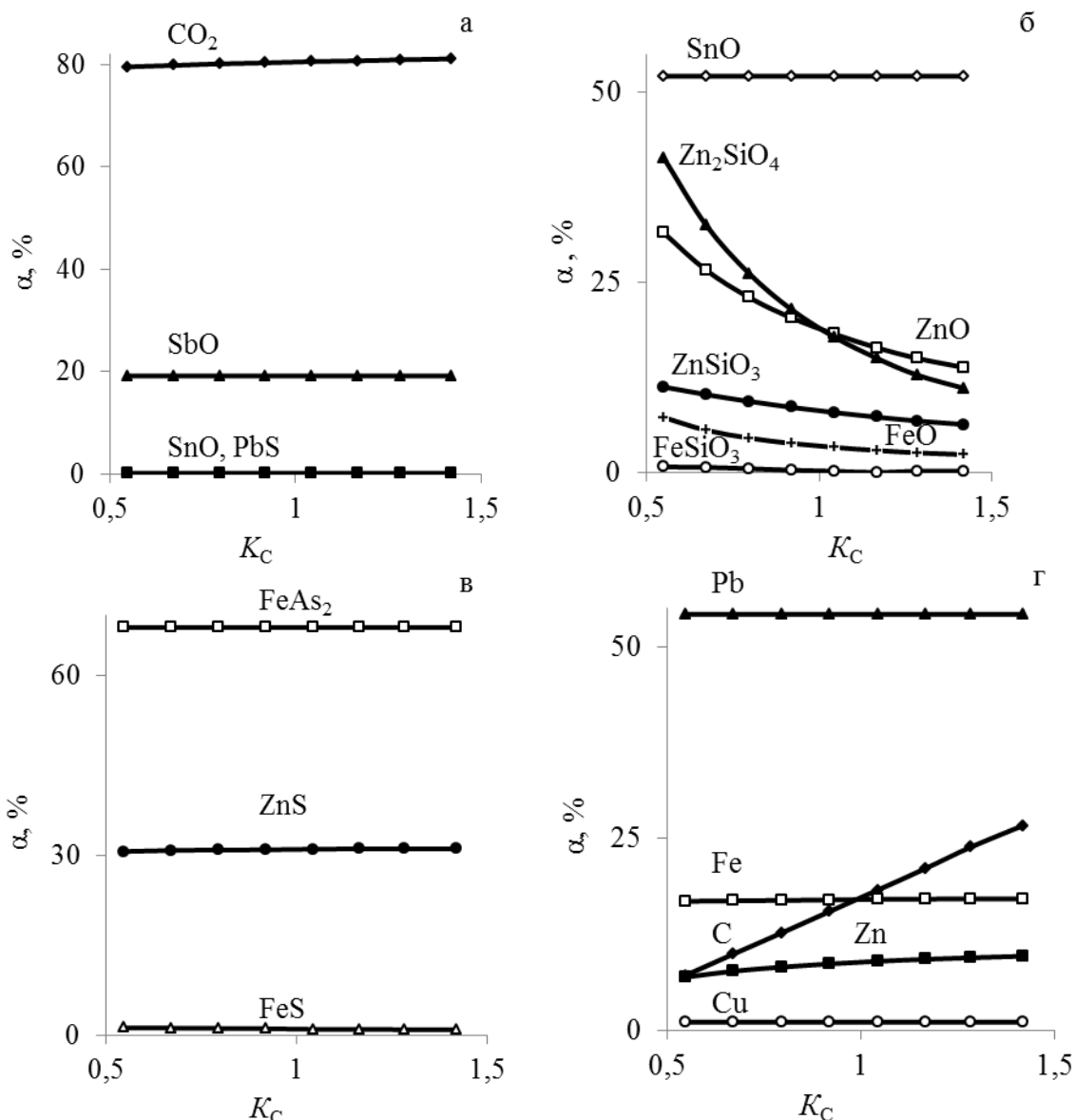
– в газовую фазу полностью переходит сурьма (прогноз 7,2% Sb); менее 1% свинца (прогноз 7,6% Pb) и ~1,3% олова (прогноз 5,3% Sn); количество возгоняемого углерода в составе CO₂ постоянно (~50% от базового значения 844,1 т) и не зависит от содержания кокса в шихте (444–1150 т);

– в шлак полностью переходит олово (прогноз 23% Sn); 3,8–1,2% железа (прогноз 95% Fe); 42,9–17,4% цинка (прогноз 28% Zn);

– в штейн переходят ~20,5% цинка и ~12% железа; суммарно в шлак и штейн переходят в базовом варианте 44,3% цинка (28% Zn прогноз) и 13,6% железа (прогноз 95% Fe);

– в металлической фазе остаются практически полностью (≥99,9%) медь, висмут (прогноз 88–90% Cu, Bi) и свинец (прогноз ~90% Pb), больше половины цинка (~55% Zn); сюда же отнесен избыток реагентов, не востребуемых в химических реакциях восстановления – железо (~86% Fe) и углерод 5,6–62,5% (49,4% C для базового варианта), обеспечивающий тепловой режим плавки.

При изменении содержания в шихте железа металлического ($K_{Fe} = 0,47–1,65$) и оксида железа ($K_{FeO} = 0,64–1,75$) различия в распределении элементов по продуктам плавки, по сравнению с базовым вариантом шихтовки, не превышают одного процента. В случае оксида кальция ($K_{CaO} = 0,46–1,28$), уменьшается содержание цинка в шлаковой фазе в интервале 27,2–21,6% за счет возрастания его количества в металлической фазе 52,2–57,7%; по остальным элементам изменений, в сравнении с базовым вариантом, не выявлено.



Зависимость фазового состава продуктов плавки: возгоны (а); шлак (б); штейн (в); металлическая (элементарная) (г) от содержания углерода в шихте

Итак, выполненный балансовый расчет многокомпонентных составов равновесия в гетерофазной системе «газ–жидкость–твердое» по программе «Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry» показал, что:

- в базовом варианте шихтовки задан практически двукратный избыток кокса как восстановителя оксидов металлов;

- свинец практически полностью переходит в металлическую фазу, как и медь с висмутом;

- железо лишь на 13–14% окисляется в реакциях восстановления с переходом в виде сульфида и оксида в штейно-шлаковую фазу, подавляющее его количество остается в элементной форме;

- цинк приблизительно поровну распределяется между металлической и штейно-шлаковой фазами;

- сурьма полностью возгоняется.

Для проверки адекватности результатов выполненных расчетов перевода свинца в металлическую фазу проведены лабораторные плавки при 1150 °С и единичных коэффициентах массы (K_C, Fe, FeO, CaO = 1,0) шихты состава, г(сух)/%: 10,2/12,9 – шлак силикатный; 50,0/63,3 – кек свинцовый; 2,9/3,7 – лигносульфонат; 2,3/2,9 – руда железная; 1,7/2,2 – стружка железная; 2,3/2,9 – известняк; 9,6/12,2 – кокс. В результате получены следующие продукты плавки, г/%: 24,1/30,5 – свинец черновой; 15,9/20,1 – штейно-шлаковая фаза; 5,14/6,5 – пылегазовая фаза (табл. 4).

Компоненты шихты и продукты лабораторной плавки, г/%

Материал	Pb	Fe	As	Sb	Cu	Zn
Поступило						
Шлак силикатный	2,3/22,5	0,1/1,0	0,06/0,6	2,01/19,7	0,06/0,6	–
Кек свинцовый	17,8/35,6	2,0/4,0	0,6/1,2	0,45/0,9	0,25/0,5	3,0/6,0
Руда железная	–	1,09/47,5	–	–	–	–
Стружка железная	–	1,62/95,0	–	–	–	–
Известняк	–	<0,01/0,2	–	–	–	–
Кокс	–	0,14/1,5	–	–	–	–
Получено						
Свинец черновой	20,6/85,5	–	1,03/4,26	2,17/9,0	0,31/1,29	0,01/0,04
Шлаковая фаза	0,3/1,9	2,27/14,3	0,14/0,89	0,07/0,46	0,05/0,33	0,92/5,8
Газовая фаза	0,02/0,4	–	–	0,21/4,1	–	2,0/38,9
Невязка баланса	–0,82/4,1	+2,73/54,6	–0,51/77,3	+0,01/0,4	+0,05/16,1	–0,07/2,3

Заключение

Лабораторные плавки подтвердили некоторые положения балансового расчета по программе «Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry», а именно: количественный перевод свинца и меди (~ 100% Pb, Cu) из составов силикатного шлака и свинцового кека в металлическую фазу; переизбыток в шихте металлического железа и железной руды (FeO) в качестве восстановителя (54% Fe от исходного количества в шпейзо-шлаковой фазе). Не совпали результаты по сурьме, которая возгорялась лишь на 8,5% и на 88,2% перешла в металлическую фазу вместе с 78,8% As, что, вероятно, объясняется невозможностью разделения шпейзовой и металлической фазы при данных содержаниях компонентов. Цинк в меньшей степени представлен в шлаковой фазе (30,7%), поскольку 66,7% его количества сконцентрировалось в газовой фазе.

Итак, на примере восстановительной плавки свинецсодержащих промпродуктов показано, что использование балансового расчета многокомпонентных составов равновесия в гетерофазной системе «газ–жидкость–твердое» по программе «Outotec's Chemical Reaction and Equilibrium Software HSC Chemistry» позволяет оптимизировать предварительный состав исходной шихты, т(сух)/мас. %: 600,0/10,89 – шлак силикатный; 4639,0/84,17 – кек свинцовый; 262,6/4,78 – лигносульфонат; 60,8/1,09 – руда железная; 50,0/0,91 – стружка железная; 100,0/1,81 – известняк; 400,0/17,26 – кокс, в частности, сократить содержание восстановителей (оксид железа, металлическое железо, кокс) и шлакообразующих компонентов (оксид кальция), а также минимизировать количество контрольных плавков для уточнения количества и состава образующихся продуктов.

Список литературы

- Li Y., Su Z., Qiao Q., 2015, Integrated assessment of process pollution prevention and end-of-pipe control in secondary lead smelting, Resources. Conservation and Recycling, In Press, Corrected Proof., Available online 23. 12. 2015.
- Bai L., Qiao Q., Li Y., 2015, Substance flow analysis of production process: a case study of a lead smelting process, Journal of Cleaner Production, 104, 502–512.
- De la Campa A. M. S., Sánchez-Rodas D., Castanedo Y.G., 2015, Geochemical anomalies of toxic elements and arsenic speciation in airborne particles from Cu mining and smelting activities: Influence on air quality, Journal of Hazardous Materials, 291, 18–27.
- Trpčevská J., Holková B., Briančin J., 2015, The pyrometallurgical recovery of zinc from the coarse-grained fraction of zinc ash by centrifugal force, International Journal of Mineral Processing, 143, 25–33.
- Ebin B., Isik M.I., 2016, Chapter 5 – Pyrometallurgical Processes for the Recovery of Metals from WEEE, WEEE Recycling, 107–137.
- Binnemans K., Jones P.T., Blanpain B., 2015, Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review, Journal of Cleaner Production, 99, 17–38.
- Пат. 2094509 Российская Федерация, МПК C22B13/02, C22B7/00. Способ получения свинца из отходов / Г.Ф. Казанцев, Н.М. Барбин, Г.К. Моисеев, Л.А. Маршук, Л.Е. Ивановский, Н.А. Ватолин, заявитель и патентообладатель Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН. № 94029711/02; заявл. 08.08.1994; опубл. 27.10.1997.
- Пат. 2114927 Российская Федерация, МПК C22B13/02, F27B17/00. Способ пирометаллургической переработки свинецсодержащих материалов и печь для его осуществления / А.В. Гречко, Е.И. Калнин, А.Д. Бессер, А.В. Тарасов; заявитель и патентообладатель ОАО Институт «Гинцветмет». № 97108450/02; заявл. 21.05.1997; опубл. 10.07.1998.
- Научно-технический отчет о выполнении 5 этапа Госу-

- дарственного контракта № 16.740.11.0522 от 16.05.2011 / ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»; Руководитель С.В. Карелов. ГРНТИ 53.37.13. Екатеринбург, 2013. 125 с. Отв. исполн. О.С. Анисимова, С.В. Мамяченков.
10. Torres C.M., Taboada M.E., Graber T.A., 2015, The effect of seawater based media on copper dissolution from low-grade copper ore, *Miner. Eng.*, 71, 139–145.
 11. Puts G.J., Crouse P.L., 2014, The influence of inorganic materials on pyrolysis of polytetrafluoroethylene. Pt. 1: The

- sulfates and fluorides of Al, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, and Mn, *J. Fluorine Chem.*, 168, 260–267.
12. Sundman B., Lu X.-G., Ohtani H., 2015, The implementation of an algorithm to calculate thermodynamic equilibria for multi-component systems with non-ideal phases in a free software, *Comput. Mater. Sci.*, 101, 127–137.
 13. Littlejohn P., J. Vaughan J., 2012, Selectivity of commercial and novel mixed functionality cation exchange resins in mildly acidic sulfate and mixed sulfate-chloride solution, *Hydrometallurgy*, 121-124, 90–99.

Поступила 20.02.17.

Принята в печать 30.05.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-24-30>

THERMODYNAMIC PREDICTION OF REDUCTION SMELTING OF LEAD CAKE

Gennady I. Maltsev – D.Sc. (Eng.), Senior Researcher, Lead Specialist of the Research Center Uralelectromed JSC, Verkhnyaya Pyshma, Russia. E-mail: mgi@elem.ru

Konstantin L. Timofeev – Ph.D. (Eng.), Chief of Hydrometallurgy Uralelectromed JSC, Verkhnyaya Pyshma, Russia. E-mail: K.Timofeev@elem.ru

Anatoliy I. Popov – Head of Laboratory at the Research Center Uralelectromed JSC, Verkhnyaya Pyshma, Russia. E-mail: An.Popov@elem.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): This article examines the possibility of creating an environmentally friendly, technologically efficient and cost-effective high-performance reprocessing technology for lead-containing middlings and wastes. Using the example of the pyrometallurgical technology of reduction smelting applied to lead cake (~35% Pb) and silicate slag (~22% Pb), the authors describe the current problems related to the optimization of traditional methods used in complex processing of polymetallic middlings from waste, with non-ferrous metals being turned into marketable products through computer simulation. **Objectives:** This study aims to look at how the phase composition and the element distribution depend on the primary charge composition, as well as to analyse the possibility of using a thermodynamic study for identifying the optimal composition of the charge used for reduction smelting of lead cake at the site of Electro zinc OJSC (Vladikavkaz) and of silicate slag. **Methods Applied:** With the help of Outotec's HSC Chemistry software package, balance calculations were performed for multicomponent equilibrium compositions in a heterogeneous gas–liquid–solid system during the reduction smelting of lead cake and silicate slag. **Originality:** The original features of this research include simultaneous smelting of lead cake and silicate slag and the use of metal shavings and iron ore, together with coke, as reducing agents, which enable the disposal of industrial waste. **Findings:** In the process of reduction smelting, it is primarily zinc that reacts to transform into gas, whereas lead, copper and antimony are concentrated within the metal phase. With the optimal composition of the charge, %: 67 – lead cake; 9 –

silicate slag; 2 – iron turnings; 3 – limestone; 12 – coke; lead, copper (>99%), most of the antimony (>88%) and arsenic (>78%) almost completely transform into the metal phase; zinc, together with oxidized iron (~54%), is distributed between the gas phase (~67%) and the speiss-slag phase (~31%). **Practical Relevance:** Initial data were obtained for optimized reduction smelting of polymetallic wastes and middlings. This will enable to expand the range of lead-containing materials that can be used in end-to-end pyrometallurgical processing to produce marketable products from non-ferrous metals.

Keywords: Melting, cake, mixture, sublimates, slag, matte, metal, lead.

References

1. Li Y., Su Z., Qiao Q., 2015, Integrated assessment of process pollution prevention and end-of-pipe control in secondary lead smelting, *Resources. Conservation and Recycling*, In Press, Corrected Proof., Available online 23. 12. 2015.
2. Bai L., Qiao Q., Li Y., 2015, Substance flow analysis of production process: a case study of a lead smelting process, *Journal of Cleaner Production*, 104, 502–512.
3. De la Campa A. M. S., Sánchez-Rodas D., Castanedo Y.G., 2015, Geochemical anomalies of toxic elements and arsenic speciation in airborne particles from Cu mining and smelting activities: Influence on air quality, *Journal of Hazardous Materials*, 291, 18–27.
4. Trpčevská J., Holková B., Briančin J., 2015, The pyrometallurgical recovery of zinc from the coarse-grained fraction of zinc ash by centrifugal force, *International Journal of Mineral Processing*, 143, 25–33.

5. Ebin B., Isik M. I., 2016, Chapter 5 – Pyrometallurgical Processes for the Recovery of Metals from WEEE, WEEE Recycling, 107–137.
6. Binnemans K., Jones P. T., Blanpain B., 2015, Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review, *Journal of Cleaner Production*, 99, 17–38.
7. Kazantsev G.F., Barbin N.M., Moiseev G.K., Marshuk L.A., Ivanovskiy L.E., Vatolin N.A. *Sposob polucheniya svinca iz otkhodov* [Method for recovering lead from waste]. Patent RF, no. 2094509, 1994.
8. Grechko A.V., Kainin E.I., Besser A.D., Tarasov A.V. *Sposob pirometallurgicheskoy pererabotki svinecsoderzhashhih materialov i pech' dlja ego osushchestvlenija* [Pyrometallurgical processing of lead-containing materials and the furnace necessary for the process]. Patent RF, no. 2114927, 1997.
9. *Nauchno-tehnicheskij otchet o vypolnenii 5 etapa Gosudarstvennogo kontrakta № 16.740.11.0522 ot 16.05.2011* [Technical report on the implementation of the 5th stage of Public Contract No. 16.740.11.0522 dated 16 May 2011]. UrFU named after the first President of Russia B.N. Eltsin; Project leader: S.V. Karelov. GRNTI 53.37.13. Ekaterinburg, 2013, 125 p.
10. Torres C. M., Taboada M. E., Graber T. A., 2015, The effect of seawater based media on copper dissolution from low-grade copper ore, *Miner. Eng.*, 71, 139–145.
11. Puts G. J., Crouse P. L., 2014, The influence of inorganic materials on pyrolysis of polytetrafluoroethylene. Pt. 1: The sulfates and fluorides of Al, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, and Mn, *J. Fluorine Chem.*, 168, 260–267.
12. Sundman B., Lu X.-G., Ohtani H., 2015, The implementation of an algorithm to calculate thermodynamic equilibria for multi-component systems with non-ideal phases in a free software, *Comput. Mater. Sci.*, 101, 127–137.
13. Littlejohn P., J. Vaughan J., 2012, Selectivity of commercial and novel mixed functionality cation exchange resins in mildly acidic sulfate and mixed sulfate-chloride solution, *Hydrometallurgy*, 121-124, 90–99.

Received 20/02/17

Accepted 30/05/17

Образец для цитирования

Мальцев Г.И., Тимофеев К.Л., Попов А.И. Термодинамическое прогнозирование восстановительной плавки свинцового кека // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 24–30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-24-30>

For citation

Maltsev G.I., Timofeev K.L., Popov A.I. Thermodynamic prediction of reduction smelting of lead cake. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 24–30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-24-30>

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.746+621.771

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-31-36>

ЛИТЬЕ И ОБЖАТИЕ ТОНКИХ СЛЯБОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х.

Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Рассмотрены технологические возможности установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации с позиции повышения качества листов из стали для сварных труб. Изложены недостатки современной технологии толстолистовой прокатки и предложены пути повышения качества листов из стали для сварных труб. Предложена технология производства листов из стали для сварных труб на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Описаны стадии совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения листов из стали для сварных труб. Дана постановка задачи для определения напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при формировании полосы из оболочки с жидкой фазой и циклической деформации затвердевшего металла. Приведены исходные данные, расчетная схема и граничные условия для определения напряженно-деформированного состояния металла в зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой. Представлены эпюры напряжений и деформаций на внешней и внутренней поверхностях узкой стенки оболочки с жидкой фазой. Дана расчетная схема и граничные условия для определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации затвердевшего металла. Приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при получении листа из стали 09Г2С сечением 8×2250 мм. Описаны закономерности распределения осевых напряжений на оси симметрии полосы и на линии контакта очага деформации со стенкой-бойком. Дана оценка схемы напряженного состояния металла в очаге циклической деформации с позиции получения листов из стали для сварных труб высокого качества. Приведены основные параметры установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб.

Ключевые слова: установка, непрерывное литье, деформация, лист, гибка, напряжение, сварная труба.

Введение

Современная технология толстолистовой прокатки при обжатии крупных непрерывнолитых слябов характеризуется значительной неравномерностью деформации по высоте сляба, что приводит к формированию неоднородной структуры толстолистового проката [1]. В связи с этим актуальной задачей является повышение степени однородности деформации в объеме непрерывнолитого сляба и формирование однородной мелкозернистой структуры толстолистового проката для сварных труб. Для этой цели необходимо увеличивать обжатия за проход, что практически невозможно осуществить, поскольку степень деформации за проход при толстолистовой прокатке составляет 10–

15%. В результате в осевой зоне сляба литая структура недостаточно прорабатывается, неметаллические включения и ликваты имеют строчечное расположение в металле вдоль оси прокатки, что снижает прочностные характеристики металла проката и возникают проблемы при производстве сварных труб. За рубежом разработана технология, при которой сочетается разливка и обжатие заготовки с жидкой фазой и затвердевшего металла несколькими парами роликов зоны вторичного охлаждения [2, 3]. Установлено, что в случае разливки тонких слябов имеет место более мелкозернистая структура металла и меньшая область ликвации в осевой зоне сляба, чем при разливке стандартных слябов толщиной 200–250 мм.

Таким образом, для улучшения качества листов из стали для сварных труб следует раз-

© Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х., 2017

работать технологию, включающую разливку тонких слябов и их обжатие с высокой степенью деформации за проход и в узком температурном интервале. Эту новую технологию производства листов из стали для сварных труб возможно реализовать на компактной установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации [3–6].

Описание процесса

Совмещенный процесс непрерывного литья и деформации включает следующие стадии [3]:

- кристаллизация расплава металла в водоохлаждаемом медном кристаллизаторе с образованием оболочки с жидкой фазой и последующее вытягивание ее из кристаллизатора стенками-бойками и тянущими роликками;
- формирование стенками-бойками полосы из оболочки с жидкой фазой путем сближения ее широких стенок и гибки боковых стенок;
- циклическая деформация стенками-бойками сборного кристаллизатора затвердевшего металла до заданных размеров листа;
- калибровка листа с целью обеспечения заданной точности размеров.

Постановка задачи

Для оценки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб проведено теоретическое исследование.

Рассматривается процесс получения листа из стали 09Г2С сечением 8×2250 мм. Толщину оболочки с жидкой фазой при выходе из кристаллизатора принимаем равной 13 мм, а в области смыкания широких стенок оболочки – 15 мм. Высота и ширина оболочки соответственно 100 и 2200 мм. Скорость вытягивания оболочки из кристаллизатора – 2,5 м/мин. Температура внутренней поверхности оболочки – 1450°C , наружной – 1200°C . Величина эксцентриситета эксцентрикового вала – 5 мм, угол наклона рабочей поверхности стенки-бойка – $12,5^\circ$. Скорость вращения эксцентриковых валов – 110 мин^{-1} .

Очень важно рассмотреть вторую стадию совмещенного процесса непрерывного литья и деформации с позиции получения листа высокого качества. На этой стадии из оболочки с жидкой фазой формируется тонкий сляб толщиной 30 мм и при периодическом сближении стенок-бойков часть жидкого металла выдавливается из конуса жидкой фазы, что способствует механическому перемешиванию расплава и ускорению процесса затвердевания металла. При этом про-

исходит удаление из конуса жидкой фазы немагнитических включений и ликваторов, что исключает образование их строчечного расположения в осевой зоне листа, что особенно важно для улучшения качества сварных труб. Для этой цели на первом этапе расчета определяли напряженно-деформированное состояние металла в зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой. Решалась задача механики сплошной среды методом конечных элементов в плоской постановке 7–12ВВ.

На рис. 1 в системе координат ХОУ представлена четвертая часть оболочки, принятая для расчета. Значения модуля упругости и сопротивления деформации для стали 09Г2С в диапазоне температур $1200\text{--}1400^\circ\text{C}$ определяли по зависимостям, приведенным в работе [5]. Величина ферростатического давления принята равной 0,05 МПа, для стенки-бойка модуль упругости – 210 ГПа, а коэффициент Пуассона – 0,3.

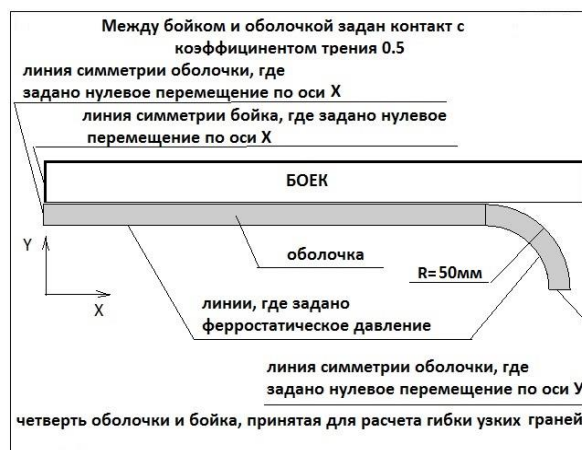


Рис. 1. Четверть оболочки и бойка принятые для расчета

Рассматривалась деформация от действия на внутреннюю поверхность оболочки ферростатического давления, а на внешнюю поверхность – по зоне контакта стенок-бойков с широкой стенкой оболочки – задаваемого перемещения стенок бойков.

Результаты расчета и их анализ

На рис. 2 приведены линии равных перемещений в направлении оси Х после полного сближения широких стенок оболочки и формирования сляба толщиной 30 мм. Следует отметить, что ширина сляба в сравнении с шириной кристаллизатора увеличилась на 46,6 мм и стала равной 2246,6 мм.

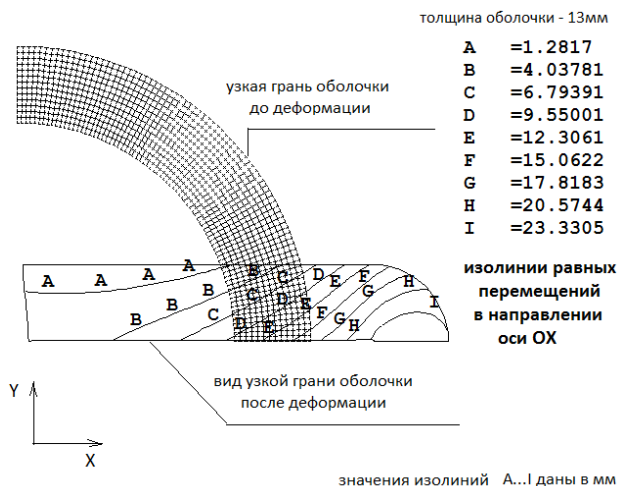


Рис. 2. Изолинии равных перемещений в направлении оси OX

На рис. 3 и 4 на недеформированном состоянии оболочки показаны эпюры максимальных напряжений σ_y и деформаций ϵ_y в направлении оси OY при полном сближении широких стенок оболочки.

Из эпюр следует, что на наружной поверхности узкой стенки оболочки напряжения σ_y растягивающие и равны 143,5 МПа, а на внутренней поверхности узкой стенки оболочки напряжения сжимающие и равны минус 183 МПа. Аналогичный характер распределения по толщине сляба имеют и деформации ϵ_y , которые на наружной поверхности узкой стенки оболочки растягивающие и равны 0,346, а на внутренней поверхности узкой стенки оболочки деформации ϵ_y сжимающие и равны величине минус 1,11.

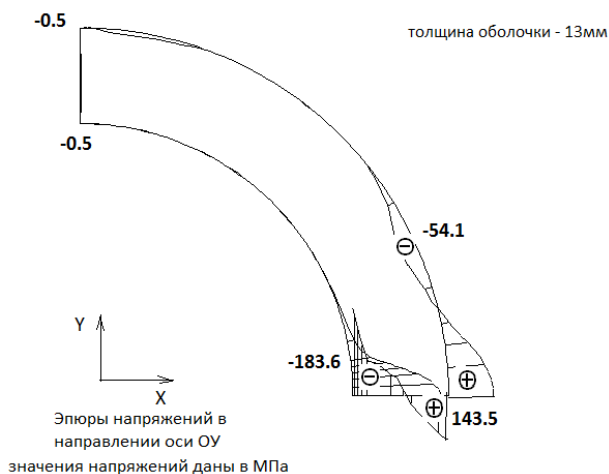


Рис. 3. Эпюры напряжений в направлении оси OY после полного смыкания широких стенок оболочки

На втором этапе расчета определяли напряженно-деформированное состояние металла в

очаге деформации затвердевшего металла. Из сляба толщиной 30 мм получали лист толщиной 8 мм, степень деформации при этом составляла 73%. Таким образом, осуществляется обжатие тонкого сляба с высокой степенью деформации за проход и в узком температурном интервале, что, как было показано выше, гарантирует получение листов из стали высокого качества.

Результаты получены решением задачи механики сплошной среды методом конечных элементов в плоской постановке.

На рис. 5 показаны положения заготовки, кристаллизатора и стенки-бойка для обеспечения выхода полосы толщиной 8 мм перед началом рабочего хода.

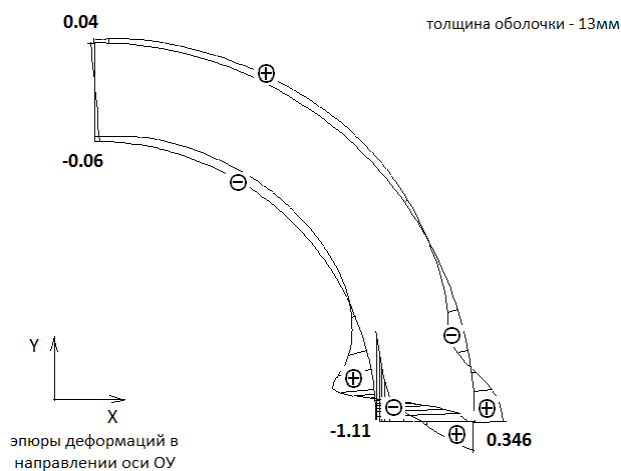


Рис. 4. Эпюры деформаций в направлении оси OY



Рис. 5. Положения заготовки, кристаллизатора и стенки-бойка для обеспечения выхода полосы толщиной 8 мм перед началом рабочего хода

На рис. 6, а, в приведены эпюры распределения напряжений по оси OX на оси симметрии и на линии контакта очага деформаций со стенкой-бойком. Полученные результаты свидетельствуют о благоприятной с позиции получения листов из стали высокого качества схеме напряженного состояния в очаге циклической деформации с преобладанием высоких (до минус 214 МПа) сжимающих напряжений. Такая закономерность распределения напряжений σ_x по толщине сляба от минус 214 до минус 199 МПа способствует достаточной проработке литой структуры по всей толщине сляба и получению мелкозернистой однородной структуры металла листов из стали для сварных труб.

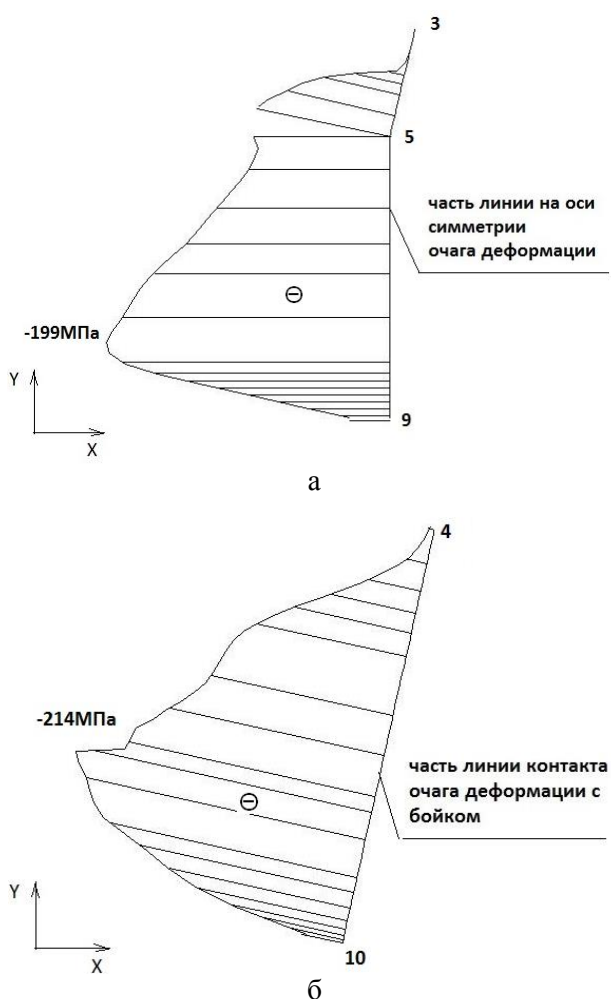


Рис. 6. Эпюры распределения напряжений по оси OX на оси симметрии и на линии контакта очага деформаций со стенкой-бойком: а – характер напряжений на оси симметрии; б – характер напряжений на части линии контакта очага деформации с бойком

Заключение

В заключение следует отметить, что технологические возможности установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации позволяют повысить качество листов из стали для сварных труб.

Основные параметры установки непрерывного литья и деформации для производства листов сечением $3 \div 22$ мм \times 2250 мм из стали 09Г2С:

- размеры кристаллизатора: высота 100 мм; ширина 2200 мм; длина 850 мм;
- величина эксцентриситета эксцентрикового вала – 5 мм;
- угол наклона рабочей поверхности стенок-бойков – $12,5^\circ$;
- скорость вытягивания слитка из кристаллизатора – 2,5 м/мин;
- величина подачи заготовки за рабочий цикл – 22,7 мм;
- скорость вращения эксцентриковых валов – 110 мин^{-1} ;
- максимальное усилие деформации – 2430 кН;
- мощность приводного электродвигателя – 4000 кВт;
- производительность – 81 т/ч.

Список литературы

1. Богатов А.А., Нухов Д.Ш., Пьянков К.П. Конечно-элементное моделирование процесса толстолистовой прокатки // *Металлург*. 2015. №2. С. 14–16.
2. Эренберг Х.-Ю. Литье и обжатие с разливки тонких слябов на заводе фирмы «Маннесман ререн-верке АГ» // *Металлургическое производство и технология металлургических процессов*. М., 1990. С. 46–56.
3. Еберле А., Воллнер Г., Габел Д. Непрерывная разливка и прокатка тонких слябов // *Сталь и железо*. 1990. №1. С. 81–88.
4. Исследование совмещенного процесса непрерывной разливки и циклической деформации для получения листов из стали / О.С. Лехов, Б.Н. Гузанов, И.В. Лисин, Д.Х. Билалов // *Сталь*. 2016. №1. С. 52–56.
5. Лехов О.С., Комратов Ю.С. Совмещенные процессы непрерывного литья и деформации для производства проката. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 411 с.
6. Лехов О.С., Турлаев В.В., Лисин И.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Теория и расчет. Екатеринбург: Изд-во УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. 112 с.
7. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. М.: Мир, 1976. 486 с.
8. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 393 с.
9. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М.: Мир, 1981. 304 с.
10. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. 432 с.

11. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986. 318 с.

12. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 6/0/ [http:// www. Cadferm/ ru/](http://www.Cadferm/ru/)

Поступила 28.03.17.

Принята в печать 23.08.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-31-36>

THIN SLAB CASTING AND ROLLING WHEN PRODUCING STEEL PLATES FOR WELDED PIPES ON A CONTINUOUS CASTING AND ROLLING PLANT

Oleg S. Lohov – D.Sc. (Eng.), Professor

Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: MXLehov38@yandex.ru

Aleksandr V. Mikhalev – Assistant Professor

Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: mialex@trubprom.com

Maxim M. Shevelev – Engineer

Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: MMShevelev@mail.ru

Damir G. Bilalov – Assistant Professor

Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: master_ddd@mail.ru

Abstract

This article considers the capabilities of a combined continuous casting and rolling plant from the perspective of improving the quality of steel plates for welded pipes. The authors describe the drawbacks of the current plate rolling process and give suggestions on improving the quality of steel plates for welded pipes. A technique is proposed that implies the use of a combined continuous casting and rolling plant for producing steel plates for welded pipes. All the stages of the combined continuous casting and rolling process are described for obtaining the steel plates for welded pipes. The problem is formulated for determining the stress-strain state of metal in deformation zones when rolling a strip from a liquid phase shell and when applying cyclic strain to the hardened metal. Initial data are given for calculations. A design model and boundary conditions are given that help calculate the stress-strain state of metal in the area where narrow side walls of the liquid phase shell experience bending stresses. Stress-strain diagrams are given for the stresses and strains observed on the outside and inside of the narrow wall of the liquid phase shell. A design model and boundary conditions are given that help calculate the stress-strain state of metal in the cyclic deformation zone of hardened metal. The authors describe the results of their research into the stress-strain state of metal in deformation zones when producing 8×2,250 mm plates from 09G2S steel. The patterns are described for axial stresses distribution along the strip centre line and on the contact line between the deformation zone and the die. The authors analyse the stress state diagram of the cyclic deformation zone from the perspective of obtaining high quality steel plates for welded pipes. The general characteristics are given of the combined continuous casting and rolling plant designed to produce steel plates for welded pipes.

Keywords: Plant, continuous casting, deformation, plate, bending, stress, welded pipe.

References

1. Bogatov A.A., Nukhov D.Sh., Piankov K.P. Finite element modelling of the plate rolling process. *Metallurg* [Metallurgist]. 2015, no. 2, pp. 14–16. (In Russ.)
2. Erenberg H.-Ju. Thin slab casting and reduction at the Mannesmannroehren-Werke AG plant. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya metallurgicheskikh protsessov* [Metallurgical production and metallurgical processes]. Moscow, 1990, pp. 46–56. (In Russ.)
3. Eberle A., Vollner G., Gabel D. Thin slab continuous casting and rolling. *Stal i zelezo* [Steel and iron]. 1990, no. 1, pp. 81–88. (In Russ.)
4. Lohov O.S., Guzanov B.N., Lisin I.V., Bilalov D.Kh. Study of the combined continuous casting and cyclic deformation process for producing steel plates. *Stal'* [Steel]. 2016, no. 1, pp. 52–56. (In Russ.)
5. Lohov O.S., Komratov Yu.S. *Sovmeshchennye processy nepreryvnogo litiya i deformatsii dlya proizvodstva prokata* [Combined continuous casting and rolling processes for rolled products]. Yekaterinburg: Ural State Technical University, 2009. 411 p. (In Russ.)
6. Lohov O.S., Turlaev V.V., Lisin I.V. *Ustanovka sovmeshchennogo protsessa nepreryvnogo litiya i deformatsii. Teoriya i raschet* [Combined continuous casting and rolling plant. Theory and design]. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural Federal University, 2014. 112 p. (In Russ.)
7. Oden G. *Konechnye elementy v nelineynoy mekhanike sploshnykh sred* [Finite elements in nonlinear continuum mechanics]. Moscow, 1976. 486 p. (In Russ.)
8. Segerlind L. *Primenenie metoda konechnykh elementov* [Application of the finite element method]. Moscow, 1979. 393 p. (In Russ.)
9. Norri D. *Vvedenie v metod konechnykh elementov* [Introduction into the finite element method]. Moscow,

1981. 304 p. (In Russ.)
10. Gallager R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy* [Finite element method. The basics]. Moscow, 1984. 432 p. (In Russ.)
11. Zenkevich O., Morgan K. *Konechnye elementy i ap-
roksimatsiya* [Finite elements and approximation]. Mos-
cow, 1986. 318 p. (In Russ.)
12. ANSYS. *Structural Analysis Guide*. Rel. 6/0/ [http// www.
Cadferm/ ru/](http://www.Cadferm.ru/)

Received 28/03/17
Accepted 23/08/17

Образец для цитирования

Литье и обжатие тонких слябов при получении листов из стали для сварных труб на установке непрерывного литья и деформации / Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М., Билалов Д.Х. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 31–36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-31-36>

For citation

Lehov O.S., Bilalov D.G., Mikhalev A.V., Shevelev M.M. Thin slab casting and rolling when producing steel plates for welded pipes on a continuous casting and rolling plant. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 31–36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-31-36>

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.73

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-37-44>

ИССЛЕДОВАНИЕ КАРТИНЫ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ОСАДКЕ

Тищук Л.И.¹, Соломонов К.Н.¹, Мазур И.П.², Кнапински М.³, Федоринин Н.И.¹¹ Московский государственный университет путей сообщения (Воронежский филиал), Воронеж, Россия² Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия³ Ченстоховский технологический университет, Ченстохова, Польша

Аннотация

Производство поковок с ребрами жесткости из алюминиевых сплавов, получаемых объемной штамповкой на гидравлических прессах большой мощности, нередко сопровождается образованием дефектов (прострел, утяжина и т.п.), которые вызваны, в том числе, неравномерностью формоизменения поковок. Для предотвращения дефектов в производственной практике используются технологические и конструкционные приемы, позволяющие управлять потоками металла по зеркалу гравюры штампа. Опыт конструкторов и технологов не всегда дает возможность правильно спроектировать поковку, инструмент и технологию производства таких деталей, что диктует необходимость проведения экспериментов. Натурные лабораторные и промышленные дорогостоящие эксперименты на сегодня утратили свое значение, благодаря развитию компьютерных и программных средств, позволяющих выполнять виртуальные эксперименты и компьютерное моделирование. Для компьютерного моделирования пластического формоизменения материалов на большинстве металлургических и машиностроительных, как отечественных, так и зарубежных, предприятиях используются, в основном, программные комплексы, базирующиеся на методе конечных элементов, которым присущи характерные особенности: большой объем памяти и быстрое действие компьютера пользователя, значительное время расчетов, громоздкость файла входных данных. Целью наших разработок является создание простого в освоении и оперативного в обращении программного комплекса для моделирования процессов пластического формоизменения металлов в процессах объемной штамповки иковки. Разработанный программный комплекс EQUI служит (пока) для компьютерного моделирования картины течения металла, которая содержит следующие изображения: контур заготовки, линии раздела течения металла и линии тока. С его помощью выполнено компьютерное моделирование формообразования профилированных заготовок при осадке. Проведены физические эксперименты по осадке заготовок той же формы. Сравнение результатов компьютерного и физического моделирования подтверждает выдвинутые гипотезы.

Ключевые слова: линия раздела течения металла, линия тока, картина течения металла, заготовка, осадка, эквидистанта, компьютерное моделирование, программный комплекс.

Введение

В производстве поковок с ребрами жесткости из плоских заготовок существенную роль играет неравномерность течения металла по контактной поверхности. В этих процессах решающее значение имеют закономерности, которым подчиняется процесс осадки полотна поковки.

Неравномерность формоизменения поковок, в значительной степени зависящая от неоднородности граничных контактных давлений, в ряде случаев приводит к образованию дефектов (прострел, плохая завязка волокон и т.п.). В производственной практике используются технологические и конструкционные приемы, дающие возможность предотвратить образование дефектов без нарушения конструкции детали. Экспериментальные дорогостоящие методы на сегодня утратили свое значение, в основном благодаря резкому скачку в развитии компьютерных и программных средств.

© Тищук Л.И., Соломонов К.Н., Мазур И.П., Кнапински М., Федоринин Н.И., 2017

Поэтому создание программных комплексов (ПК), предназначенных для моделирования формообразования заготовок в процессах пластической деформации [1], позволяющих указать места возможного образования дефектов, в настоящее время играет первостепенную роль.

Для компьютерного моделирования пластического формоизменения материалов на большинстве металлургических и машиностроительных предприятий в различных странах мира сегодня используются, в основном, программные комплексы, базирующиеся на методе конечных элементов. Наиболее известные из них DEFORM, ANSYS, FORGE и др. [2].

К достоинствам этих ПК можно отнести: широту охвата решаемых задач; достаточно высокую точность получаемых результатов, которая обеспечивается, в основном, благодаря учету многих факторов – температуры, реологии [3], материала и т.п. В качестве недостатков можно отметить следующие: весьма высокие требования к параметрам компьютерной техники; зна-

чительное время расчета и моделирования одного варианта; сравнительно высокую сложность и низкую скорость создания файла входных данных; затратность обучения пользователей.

Конечной целью наших разработок является создание простого в освоении и оперативного в обращении ПК для моделирования процессов пластического формоизменения металлов в процессах объемной штамповки иковки, способно служить интеллектуальным помощником конструктора и технолога.

Математические модели, описывающие пластическое течение металла в процессах ОМД, весьма громоздки, поскольку содержат дифференциальные уравнения, характеризующие множество параметров (температуру, время, реологию, напряжения, деформации, плотность и т.д.), что позволяет максимально приблизить модель процесса к реальным условиям. Следствием этого является усложнение программной реализации алгоритмов, базирующихся на таких моделях.

Другой принципиально отличный подход заключается в упрощении математической модели еще на стадии ее разработки, а следовательно, и облегчении системы дифференциальных уравнений и сведения ее, по возможности, к аналитическим зависимостям [4]. В таких случаях приходится отказываться от всеобщности математической модели и ограничиваться описанием всего нескольких процессов ОМД, пренебрегая зачастую температурными и реологическими параметрами. Некоторые процессы ОМД (например, те из них, которые проходят при температуре рекристаллизации, благодаря чему упрочнением металла можно пренебречь) позволяют это делать без больших погрешностей.

Тогда для процессов ОМД, характеризуемых осадкой полотна заготовки, которая имеет ярко выраженные «плоскостные участки», основным можно считать вопрос о построении картины течения металла по плоскости контакта инструмента и деформируемой заготовки.

1. Принципы формообразования плоских заготовок

В качестве одного из способов решения задачи моделирования картины течения металла по плоскости контакта в процессахковки и штамповки мы предлагаем так называемую «эквидистантную теорию», основанную на трех «минимизационных» [5] принципах:

1) **Принцип наименьшего сопротивления**, выдвинутый применительно к пластической деформации Г. Треска (1895 г.), сформулирован С.И. Губкиным [6] следующим образом: «В случае возможности перемещения точек деформируемого тела в различных направлениях, каждая его точка

перемещается в направлении наименьшего сопротивления». Прямым следствием закона наименьшего сопротивления является, например, образование заусенца при штамповке в открытых штампах. Металл в начальный период штамповки начинает вытекать в стороны за пределы фигуры штампа в зазор между верхним и нижним штампами. Заполнение же элементов полости штампа возможно, если сопротивление течению металла в заусенец становится больше сопротивления течению в те или иные участки полости. Сопротивление течению металла в заусенец увеличивается по мере уменьшения его толщины в процессе движения верхнего штампа, что и обеспечивает в конечном итоге заполнение всех элементов полости. Для практического применения закона наименьшего сопротивления необходимо знать направление траектории, по которой для точек, на ней расположенных, сопротивление течению будет наименьшим.

Принцип наименьшего сопротивления следует учитывать при теоретических исследованиях и при решении практических задач. Так, например, штамповка осадкой круглой в плане поковки во многих случаях может быть осуществлена из заготовки с квадратным поперечным сечением.

2) Для случая осадки (сжатия) призматических и цилиндрических тел между параллельными плитами (бойками) при наличии трения по плоскостям контакта эти траектории определяются по **принципу кратчайшей нормали**, сформулированному А.Ф. Головиным [7], заключающемуся в том, что перемещение любой точки тела в плоскости, перпендикулярной к действию внешней силы, происходит по кратчайшей нормали к периметру сечения. Следует добавить, что максимальную конечную деформацию тело получит в тех направлениях, по которым будет передвигаться наибольшее количество точек. Пусть, например, осаживается призма с прямоугольным основанием. Согласно принципу перемещения точек по кратчайшей нормали к периметру сечения прямоугольник можно разделить на два треугольника и две трапеции линиями, представляющими собой граничные линии или линии раздела течения, поскольку длина нормалей к периметру сечения по обе стороны из каждой точки, лежащей на этих линиях, будет одинаковой. Учитывая количество точек тела, расположенных на направлениях течения в данном сечении, можно предположить, что после некоторой осадки сечение примет вид многоугольника. Нетрудно представить, что при увеличении степени осадки тела, рассматриваемого в нашем примере, периметры его поперечных сечений стремятся к эллипсам, а эллипсы в дальнейшем преобразуются в круги, после чего движение точек происходит по радиусам.

3) Такая закономерность изменения формы поперечных сечений тела при осадке была замечена еще К. Зоббе (1908 г.) [8], который предложил **принцип наименьшего периметра**. Этот принцип можно сформулировать так: любая форма поперечного сечения призматического или цилиндрического тела при осадке его в пластическом состоянии с наличием контактного трения стремится принять форму, имеющую при данной площади наименьший периметр, т. е. в пределе стремится к кругу.

Принцип наименьшего периметра справедлив при перемещении точек деформируемого тела по кратчайшим нормальным к периметрам сечений, перпендикулярных к направлению действующей силы. В дальнейшем было установлено, что кратчайшая нормаль не всегда является направлением наименьшего сопротивления, а лишь при условиях: если трение на поверхностях контакта металла с инструментом изотропно, т. е. одинаково по всем направлениям; если величина контактного трения значительна [9].

При осадке, например, прямоугольного параллелепипеда между плоскими бойками без контактного трения схема перемещения точек отличается от описанной выше, когда прямоугольник превращается в многоугольник, а затем эллипс и круг. Движение частиц в плоскостях, нормальных к направлению внешней силы, носит радиальный характер, и поперечные сечения в процессе деформации будут оставаться подобными исходным.

Заметим, между прочим, что рассмотренные выше принципы действительны для деталей, имеющих ярко выраженное полотно (т.е. плоскостные участки). Несмотря на кажущуюся ограниченность области применения данной теории из-за вышеприведенной оговорки, тем не менее, детали с признаком «плоскостности» составляют обширный класс, охватывающий, например, ракето- и самолетостроение, да и в целом машиностроение.

В соответствии с этими принципами можно сделать выводы:

– существует некая линия, вдоль которой скорости перемещения частиц металла равны нулю, называемая линией раздела течения металла;

– линия раздела течения металла является геометрическим местом точек, равноудаленных от контура детали (поковки) или границы контура вдоль ребер жесткости;

– линии тока направлены под некоторым углом к контуру заготовки, который зависит от условий трения. Во всяком случае, можно считать, что кинематическая схема течения металла – радиальная, т.к. всегда можно построить некоторый «условный контур», по отношению к которому линии тока будут ортогональны.

Таким образом, для изучения формообразования поковки с ребрами жесткости, полотно которой деформируется в процессе осадки, необходимо исследование картины течения металла, которая включает следующие изображения: контур поковки, линии раздела течения металла и линии тока.

Тогда задача сводится к чисто геометрической, а именно нахождению эквидистанты некоторой замкнутой плоской гладкой (или кусочно-гладкой) линии (контура). Несмотря на кажущуюся простоту постановки указанной задачи, попытки ее решения натолкнулись на трудности, связанные с разработкой алгоритма построения эквидистанты и его программной реализацией. Оказалось, что для сложных многосвязных контуров решение находится достаточно точно и быстро, в то время как для простых вызывает элементарные ошибки.

2. Методика построения картины течения металла

Контур поковки с достаточной точностью можно аппроксимировать фрагментами прямых и дуг окружностей [10]. При необходимости возможна аппроксимация фрагментов контура любыми кривыми. Допустимое количество фрагментов задается при инициализации ПК EQU1.

В текстовом файле содержатся исходные данные:

а) Точность расчетов, которая может быть задана в нормализованном виде. Чем меньше заданное число, тем выше точность расчетов и больше время работы программы.

б) Шаг разбивки контура, позволяющий весь контур разбить на точки так, что расстояние между любыми соседними точками будет не больше заданной величины. Чем меньше заданное число, тем выше точность расчетов и больше время работы программы.

в) Параметры формы контура, записанные для каждого фрагмента в отдельную строку. Первые два поля строки должны содержать координаты начала фрагмента. Следующее поле определяет тип линии фрагмента и должно содержать служебные слова «прямая» или «окружность». На этом строка должна закончиться. Конечной точкой текущего фрагмента является начальная точка следующего фрагмента. Конечной точкой последнего фрагмента является начальная точка самого первого фрагмента. Начинать можно с любого фрагмента, но необходимо делать это последовательно, обходя контур против часовой стрелки. Количество строк с информацией о фрагментах контура определяет фактическое количество фрагментов контура, которое должно быть меньше допустимого.

Пример текстового файла:

1e-6 { точность расчетов }
 0.005 { шаг разбивки контура }
 0 0 прямая { координаты начала 1-го участка }
 4 0 окружность { 2-й участок }
 6 0 2 1
 8 0 окружность
 4 0 4 -1

Если пользователь не желает, чтобы на рисунке с построенными эквидистантами присутствовали номера узловых точек контура, соответствующий флажок на панели управления нужно убрать. После выбора файла и нажатия кнопки «Начать» получаем результат (рис. 1).

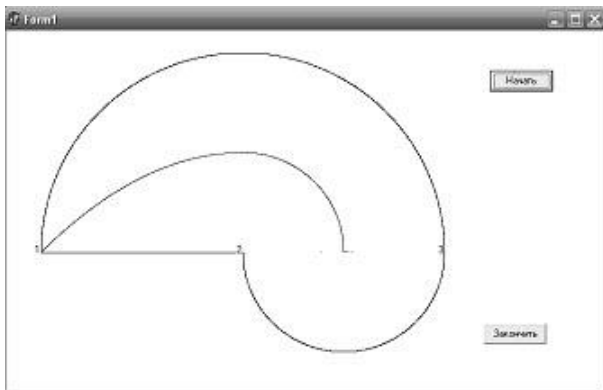


Рис. 1. Результат компьютерного моделирования

Размеры окна, в котором осуществляется построение, фиксированы, а показываемый контур всегда масштабируется так, чтобы занимать максимально полно все пространство окна.

Одновременно с построением на экране программа создает в той же папке, где находится, текстовый файл, файл выходных данных, содержащий координаты найденных точек эквидистанты, а также координаты ближайших к ним точек контура, что позволяет строить линии тока. Нажав на кнопку «Начать», можно инициировать построение для другого контура. Завершается работа программы нажатием на кнопку «Закончить».

Алгоритм действия ПК EQUI подробно представлен в [11]. Рассмотрим основные эпизоды его формализации.

После чтения исходных данных проверяется необходимость их коррекции. Если в какой-либо точке контура производная стремится к бесконечности, то происходит переполнение ячейки, и процессор аварийно прекращает выполнение программы. Чтобы избежать этого, программа предварительно корректирует исходные данные: если фрагмент контура – вертикальная прямая, то начальная точка этого фрагмента смещается по линии предыдущего фрагмента, руководствуясь следующим.

Если предыдущий фрагмент тоже прямая ли-

ния, то новые координаты узловой точки $(x; y)$ будут определены так:

$$x = x_0 - \text{sign}(x_0 - x_p) \cdot \delta;$$

$$y = \gamma(x_0 - x_p) + y_p,$$

где $\gamma = \frac{y_0 - y_p}{x_0 - x_p}$ – тангенс угла наклона преды-

дущего фрагмента; x_0, y_0 – заданные координаты начала модифицируемого фрагмента; x_p, y_p – координаты начала предыдущего фрагмента; δ – заданная точность вычислений;

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x > 0 \\ -1, & \text{если } x < 0 \end{cases} \text{ – единичная функция.}$$

Если предыдущий фрагмент – окружность, то координаты $(x; y)$ точки этой окружности, отстоящей на расстояние δ от другой точки этой же окружности с координатами $(x_0; y_0)$, можно определить так. Имеем два уравнения:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R_c^2;$$

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = \delta^2,$$

где x_c, y_c – координаты центра окружности; R_c – радиус окружности.

После несложных преобразований получим квадратное уравнение

$$(1 + k^2)x^2 - 2(x_c - k(\lambda - y_c))x + x_c^2 + (\lambda - y_c)^2 - R_c^2 = 0,$$

корни которого вычисляются из соотношения

$$x_{1,2} = x_c - k(\lambda - y_c) \pm \sqrt{D}.$$

Если $x_0 > x_c$, то используется корень $x_2 = x_c - k(\lambda - y_c) - \sqrt{D}$, а если $x_0 < x_c$, то корень $x_1 = x_c - k(\lambda - y_c) + \sqrt{D}$.

Если фрагмент контура – полуокружность на участке от x_n до x_k , в крайних точках производная стремится к бесконечности. Поэтому заменяем данную окружность другой, у которой радиус будет больше на величину δ . Соответственно координата центра окружности будет смещена по оси ординат на величину

$$\Delta y = \mp \sqrt{\left(\frac{x_k - x_n}{2} + \delta\right)^2 - \left(\frac{x_k - x_n}{2}\right)^2} = \mp \sqrt{\delta(x_k - x_n + \delta)}.$$

Далее EQUI приступает к разбивке контура с соблюдением заданного максимального шага с использованием простого итерационного процес-

са: начиная с начальной точки контура делается шаг по оси абсцисс, равный величине максимального шага, определяется значение по оси ординат, вычисляется расстояние от полученной точки до предыдущей. Если это расстояние больше величины максимального шага, процедура повторяется, только с шагом, уменьшенным вдвое. Координаты полученной точки сохраняются вместе со значениями производной в этой точке контура. Производная вычисляется соответственно:

$$\text{для прямой } y' = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}},$$

$$\text{для окружности } y' = -\frac{x - x_C}{y - y_C},$$

где x, y – координаты текущей точки контура; x_{i-1}, y_{i-1} – координаты начальной точки текущего фрагмента контура; x_i, y_i – координаты конечной точки текущего фрагмента контура; x_C, y_C – координаты центра кривизны текущего фрагмента контура.

При разбивке контура учитываются особенности его формы. В узловых точках контура проверяется условие его выпуклости

$$(y_{i+1} - y_{i-1}) \cos \beta - (x_{i+1} - x_{i-1}) \sin \beta > 0,$$

где x_{i-1}, y_{i-1} – координаты любой точки, находящейся на луче, выходящем из рассматриваемого узла контура и имеющем направление, совпадающее с касательной к фрагменту, заканчивающемуся в этом узле; x_{i+1}, y_{i+1} – координаты любой точки, находящейся на луче, выходящем из рассматриваемого узла контура и имеющем направление, совпадающее с касательной к фрагменту, начинающемуся в этом узле; $\beta = \arctg \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}$ – угол по-

ложения рассматриваемой вершины контура относительно $i-1$ -й точки ($\beta \in [0; 2\pi)$); x_i, y_i – координаты рассматриваемой вершины контура.

Если внутренний угол контура более 180° (контур не выпуклый), то возникает ситуация, когда линии тока с определенной части внутренней поверхности рассматриваемой заготовки будут сходиться именно в вершине этого угла. Поэтому при разбивке контура программа считает, что в таких узловых точках сосредоточено множество бесконечно малых отрезков прямых, последовательно осуществляющих поворот от направления угла наклона предыдущего фрагмента к последующему на величину избыточного угла. Другими словами, программа генерирует последовательность точек (псевдоточек), имеющих одни и те же координаты, но имеющих производные, отличающиеся на определенную величину. Величина шага угла наклона опреде-

ляется соотношением

$$\Delta\varphi = \frac{2h}{x_i - x_{i-1}},$$

где h – величина заданного максимального шага разбивки.

Далее начинается главное – поиск эквидистантных точек, т.е. точек, которые образуют эквидистанту. Схематично последовательность действий такова. Последовательно в каждой i -й точке контура восстанавливается перпендикуляр к касательной, а затем по очереди перпендикуляры к касательным во всех остальных j -х точках контура до пересечения с первым перпендикуляром. Первым делом проверяется – находится ли полученная точка пересечения внутри контура. Если нет – переходим к следующей $j+1$ -й точке. Если да, то сравниваем расстояния от точки пересечения перпендикуляров до i -й и j -й точек. Если эти расстояния оказываются близки друг к другу, то координаты такой точки запоминаются. Когда все j -е точки будут пройдены, то из всех запомненных точек выбирается одна, у которой расстояние до i -й точки минимально. Это и есть эквидистантная точка. Далее можно переходить к следующей $j+1$ -й точке.

Проверка нахождения точки внутри контура основана на следующем принципе. Подсчитываем количество точек контура, имеющих такую же абсциссу и расположенных выше рассматриваемой точки. Если это количество нечетно – точка внутри контура, если четно – вне его.

Определение координат точки, равноотстоящей от точек с номерами i и j соответственно, организовано следующим образом. Как только соответствующая точка пересечения перпендикуляров к касательным для i -й и j -й пары точек контура оказывается внутри контура, определяется знак величины $d_i - d_j$ (d_i – расстояние от найденной точки пересечения перпендикуляров до i -й точки контура; d_j – расстояние до j -й точки). Затем процедура повторяется для пары i -й и $j+1$ -й точек. Если точка пересечения оказалась вне контура, то процесс прекращается, т.е. кандидата на эквидистантную точку пока нет. Если точка осталась внутри контура, сравниваем знак выражения $d_i - d_{j+1}$ со знаком $d_i - d_j$. Если знак не изменился, берем следующую $j+2$ -ю точку и т.д. до тех пор, пока не найдем такую $j+k$ -ю точку, чтобы знаки выражений $d_i - d_{j+k}$ и $d_i - d_{j+k+1}$ были различны. Линейной аппроксимацией находим координату по оси абсцисс промежуточной точки

$$x = x_{j+k} + \mu(x_{j+k+1} - x_{j+k}),$$

где x_{j+k}, x_{j+k+1} – координаты $j+k$ -й и $j+k+1$ -й точек контура;

$$\mu = \left| \frac{d_i - d_{j+k}}{d_{j+k+1} - d_{j+k}} \right| - \text{коэффициент.}$$

Далее определяется координата по оси ординат промежуточной точки, строится перпендикуляр к касательной в этой точке и точка пересечения этого перпендикуляра с перпендикуляром к касательной в i -й точке регистрируется в качестве, так называемой, «псевдоточки», т.е. точки, которая может лежать на эквидистанте.

Если i -я или $j+k$ -я точки окажутся псевдоточками, тогда аппроксимируется не координата по оси абсцисс, а производная в этой точке. Например, для $j+k$ -й псевдоточки

$$y' = y'_{j+k} + \mu(y'_{j+k+1} - y'_{j+k}),$$

где y'_{j+k}, y'_{j+k+1} – производные в $j+k$ -й и $j+k+1$ -й точках контура.

И в качестве искомой точки берется точка пересечения перпендикуляра к касательной в i -й точке и прямой, проведенной через $j+k$ -ю псевдоточку с тангенсом угла наклона y' .

В частном случае, когда i -я точка является псевдоточкой, а j -я точка находится на дуге окружности, координаты центра которой совпадают (точнее, находятся вблизи) с координатами i -й псевдоточки (или наоборот), возникает коллизия, когда вышеописанный алгоритм практически не работает, потому что приходится искать точку пересечения почти параллельных прямых. Но выход очевиден: точка, претендующая на звание эквиточки, находится на середине отрезка, соединяющего i -ю и j -ю точки.

Описанный алгоритм позволяет построить картину течения металла для кусочно-нелинейного контура.

3. Компьютерное моделирование картины течения металла

На основании представленного алгоритма разработан ПК EQUI, позволяющий моделировать картину течения металла по плоскости контакта инструмента и заготовки в процессахковки и объемной штамповки, в которых наблюдается деформационная схема осадки.

С целью апробации разработанного ПК EQUI было проведено моделирование картины течения металла при осадке плоских заготовок, имеющих форму «звезда» и «четырёхлистник». При этом в качестве кинематической схемы течения металла выбрана нормальная схема течения металла, обеспечивающая направление линий тока ортогонально контуру заготовки. Такое допущение возможно в первом приближении для общей оценки распределения потоков металла по контактной

плоскости. В дальнейшем предполагается введение в расчетный алгоритм поправочных коэффициентов, учитывающих трение и сопротивление истечению металла в различные полости.

Анализ картины течения металла (рис. 2) для заготовок в форме «звезда» и «четырёхлистник» показывает, что наиболее интенсивного течения металла следует ожидать во внутренних угловых точках, что объясняется большим притоком металла в эти точки, т.к. в них сходится пучок линий тока, в то время как вдоль контура с гладкими участками линии тока распределены равномерно, и никаких «всплесков» в распределении потоков металла по зеркалу гравюры штампа не прогнозируется. Тогда можно предположить, что заготовки в ходе деформации сначала превращаются в выпуклые многоугольники (для звезды), а затем должны по форме приближаться к кругу.

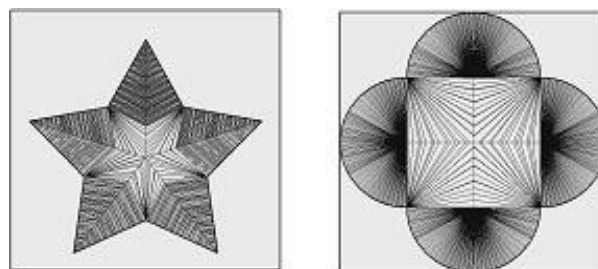


Рис. 2. Картина течения металла для односвязных контуров

ПК EQUI дает возможность моделировать картину течения металла и для многосвязных контуров, что расширяет область ее применения. Картина течения металла, полученная с помощью ПК EQUI, для трехсвязного контура, изображенного на рис. 3, может быть применена для анализа формообразования плоской заготовки в форме круга с двумя круглыми нецентральными вырезами.

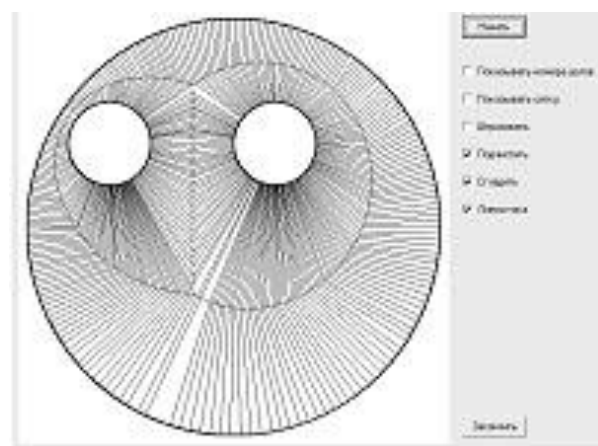


Рис. 3. Картина течения металла для многосвязного контура

4. Физическое моделирование осадки профилированных заготовок

С целью проверки обоснованности выдвинутых гипотез и предположений и подтверждения работоспособности ПК EQUI был проведен натурный эксперимент по осадке пластилиновых плоских заготовок в форме «звезда» и «четырёхлистник».

Образцы осаживались постадийно до степени деформации: 0,33, 0,54, 0,75 и 0,83 (рис. 4). Начальная толщина заготовки равнялась 24 мм, конечная – 4 мм. Линейные размеры образцов колебались в пределах 50×50 мм. Образцы деформировались между жесткими гладкими плоскими поверхностями. Смазка не применялась, однако для предотвращения прилипания пластилина к рабочим поверхностям инструмента использовалась в качестве прокладки целлофановая пленка. Осадка образцов производилась на ручном прессе мощностью одна человеческая сила.

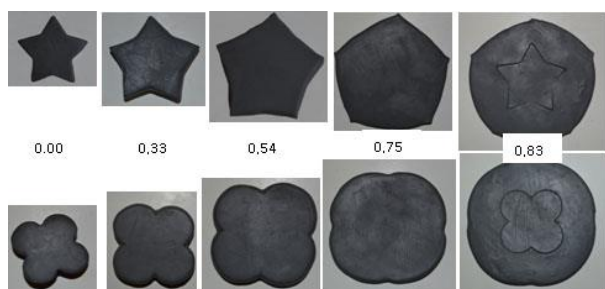


Рис. 4. Постадийная осадка пластилиновых образцов

Как видим, внутренние угловые зоны заготовки формируются наиболее интенсивно, и с увеличением степени деформации каждая из заготовок постепенно превращается в круг, что вполне соответствует рассмотренным принципам и анализу картины течения металла, выполненному на основании компьютерного моделирования с помощью ПК EQUI.

Результаты и выводы

1. Предложен новый подход для описания картины течения металла при деформировании плоских заготовок, базирующийся на «минимизационных» принципах.

2. На основе нового подхода разработаны алгоритм и программный комплекс EQUI, который может служить инструментом для исследования формообразования плоских заготовок.

3. Анализ результатов компьютерного моделирования и лабораторного эксперимента по осадке плоских образцов подтверждает эффективность разработанной методики и обоснованность выдвинутых гипотез и предположений.

Список литературы

1. Solomonov, K., 2012, Application of CAD/CAM Systems for Computer Simulation of Metal Forming Processes, Materials Science Forum, 704–705, 434–439.
2. Тищук Л.И., Соломонов К.Н. Анализ рынка программных продуктов, предназначенных для моделирования технологических процессов // Вестник Карагандинского государственного индустриального университета. 2013. №2. С. 50–55.
3. Мазур И.П., Борисов С.С., Кавалек А. Исследование упрочнения труднодеформируемой стали типа HSLA при холодной прокатке // Производство проката. 2012. №7. С. 8–13.
4. Solomonov, K., 2014, Development of software for simulation of forming forgings, Procedia Engineering, 8, 437–443.
5. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1971.
6. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургиздат, 1947.
7. Головин А.Ф. Прокатка. М.: Металлургиздат, 1933.
8. Sobbe, C., 1908, Beiträge zur Technologie des Schmiedepressens, Werkstattstechnik, 9, 457–471.
9. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А. Деформации и усилия при обработке металлов давлением. М.: Машгиз, 1959.
10. Константин Соломонов. Моделирование формообразования поковок: исследования, гипотезы, разработки. Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2011.
11. Соломонов К.Н., Федоринин Н.И., Тищук Л.И. Методика построения линии раздела течения металла в процессах осадки плоских заготовок // Вестник научно-технического развития. 2016. № 2. С. 36–55.

Поступила 27.03.17.

Принята в печать 07.06.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-37-44>

STUDY OF METAL FLOW PATTERN DURING UPSETTING

Liudmila I. Tishchuk – Head of Laboratory

Moscow State University of Railway Engineering (Voronezh Branch), Voronezh, Russia. E-mail: liudmila.tishchuk@mail.ru

Konstantin N. Solomonov – D.Sc. (Eng.), Professor
Moscow State University of Railway Engineering (Voronezh Branch), Voronezh, Russia. E-mail: konssol@list.ru

Igor P. Mazur – D.Sc. (Eng.), Professor
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: mazur_ip@mail.ru

Marcin Knapinski – D.Sc. (Eng.), Dean
Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland.

Nikolai I. Fedorinin – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
Moscow State University of Railway Engineering (Voronezh Branch), Voronezh, Russia.

Abstract

Production of forgings with stiffeners, which are made from aluminium alloys on a heavy-duty hydraulic die forging machine, can often lead to defects such as bursts, shrinkage holes and so on, which can also occur due to uneven deformation. To prevent such defects, certain process- and design-related techniques are used in actual production that help control the flow of metal across the die impression. The experience of designers and process engineers is not always sufficient for them to properly design the forging, the tool and the process, which makes experiments necessary. Due to advances in computers and software, which now enable to carry out virtual experiments and computer simulation, costly laboratory and field experiments are not relevant any more. For computer simulation of forming processes, most of steel and machine producers, both in Russia and abroad, rely on FEM software packages, which have the following features: a large amount of memory and a high speed of the user computer, long calculation times, a big size of the input file. The aim of this research is to create a simple and user-friendly simulation software package for modelling metal forging processes. The developed software package EQUI is used (so far) for computer simulation of the metal flow pattern and contains the following images: the workpiece contour, the metal flow boundary and the flow line. Using this software, the upsetting process was simulated. Physical experiments were carried out in which workpieces of the same shape were produced by upsetting. A comparison of the results of the computer and physical simulation confirms the suppositions suggested.

Keywords: Metal flow boundary, flow line, metal flow pattern, workpiece, upsetting, equidistant curve, computer simulation, software package.

References

1. Solomonov, K., 2012, Application of CAD/CAM Systems for Computer Simulation of Metal Forming Processes, Materials Science Forum, 704–705, 434–439.
2. Tishchuk L.I., Solomonov K.N. Market analysis for the process simulation software market. *Vestnik Karagandinskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta* [Bulletin of the Karaganda State Industrial University], 2013, no. 2, pp. 50–55. (In Russ.)
3. Mazur I.P., Borisov S.S., Kavalek A. Studying the hardening behaviour of HSLA steel during cold rolling. *Proizvodstvo prokata* [Rolling], 2012, no. 7, pp. 8–13. (In Russ.)
4. Solomonov, K., 2014, Development of software for simulation of forming forgings, *Procedia Engineering*, 8, 437–443.
5. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem* [Theory of metal forming]. Moscow: Mashinostroenie, 1971. (In Russ.)
6. Gubkin S.I. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem* [Theory of metal forming]. Moscow: Metallurgizdat, 1947. (In Russ.)
7. Golovin A.F. *Prokatka* [Rolling]. Moscow: Metallurgizdat, 1933. (In Russ.)
8. Sobbe, C., 1908, Beiträge zur Technologie des Schmiedepressens, *Werkstattstechnik*, 9, 457–471.
9. Tamovskiy I.Ya., Pozdeev A.A., Ganago O.A. *Deformatsii i usiliya pri obrabotke metallov davleniyem* [Deformation and forces in metal forming]. Moscow: Mashgiz, 1959. (In Russ.)
10. Solomonov K. *Modelirovaniye formobrazovaniya pokovok: issledovaniya, gipotezy, razrabotki* [Simulation of the forging process: Research, hypotheses, developments]. Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2011. (In Russ.)
11. Solomonov K.N., Fedorinin N.I., Tishchuk L.I. A method of designing a metal flow boundary when upsetting flat workpieces. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* [Bulletin of scientific and technical development], 2016, no. 2, pp. 36–55. (In Russ.)

Received 27/03/17

Accepted 07/06/17

Образец для цитирования

Исследование картины течения металла при осадке / Тишчук Л.И., Соломонов К.Н., Мазур И.П., Кнапински М., Федоринин Н.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 37–44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-37-44>

For citation

Tishchuk L.I., Solomonov K.N., Mazur I.P., Knapinski M., Fedorinin N.I. Study of metal flow pattern during upsetting. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 37–44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-37-44>

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 669.017:620.193

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-45-53>

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АНОДНОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВА АЖ2,18, МОДИФИЦИРОВАННОГО ЛИТИЕМ, БЕРИЛЛИЕМ И МАГНИЕМ, В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl

Азимов Х.Х.¹, Ганиев И.Н.¹, Амонов И.Т.², Джураева М.Ш.¹¹ Институт химии им. В. И. Никитина АН Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан² Таджикский технический университет им. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан

Аннотация

Известно, что технический алюминий с повышенным содержанием железа, кремния и других примесей из-за низких эксплуатационных характеристик не может найти применение в промышленности, поэтому разработка новых составов сплавов на основе такого металла является весьма актуальной задачей. Одним из перспективных составов на диаграмме алюминий-железа является эвтектика (α -Al+Al₃Fe), который, имея минимальный интервал кристаллизации, соответствует содержанию железа 2,18% (мас.). Данный состав был принят нами в качестве модельного сплава и подвергался модифицированию литием, бериллием и магнием. Цель работы заключается в установлении влияния указанных добавок на коррозионно-электрохимическое поведение модельного сплава АЖ2,18 в среде электролита NaCl. Для достижения поставленной цели потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме при скорости развёртки потенциала 2 мВ/с на потенциостате ПИ-50.1.1 исследовано анодное поведение сплава АЖ2,18, модифицированного вышеуказанными металлами. Показано, что потенциал свободной коррозии (стационарный потенциал) сплавов с ростом содержания модификатора изменяется в положительном направлении оси координат, а с концентрацией хлорид-иона в отрицательном направлении оси координат в среде электролита NaCl. Величины потенциалов питтингообразования и репассивации сплавов по мере роста концентрации хлорид-иона в электролите уменьшаются. Увеличение концентрации модификаторов в исходном сплаве АЖ2,18 способствует росту величины потенциалов питтингообразования и репассивации во всех средах независимо от концентрации хлорид-иона. Плотность тока коррозии и соответственно скорость коррозии сплавов с ростом концентрации хлорид-иона увеличивается, а от добавок модификатора уменьшается в два раза. Результаты исследования могут быть использованы при разработке составов новых алюминиево-железовых сплавов, которые используются в различных отраслях техники.

Ключевые слова: сплав АЖ2,18, литий, бериллий, магний, потенциостатический метод, электрохимическая коррозия, анодное поведение, потенциал коррозии, скорость коррозии.

Введение

В последние годы интерес к созданию новых конструкционных материалов, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками по сравнению с традиционными материалами, возрастает. Отсюда разработка и изучение свойств новых алюминиевых сплавов с участием малоизученных легирующих и модифицирующих добавок, устойчивых к агрессивным средам, является весьма актуальной задачей.

Некоторая часть первичного алюминия, извлекаемого из электролизёров (алюминия сырец), содержит значительное количество таких примесей, как железо и кремний, которые переходят непосредственно из сырья (глинозёма) и

стальной оснастки при работе с расплавом алюминия. Примеси железа в алюминии оказывают существенное влияние на качество алюминия, и с увеличением их количества значительно ухудшаются коррозионная стойкость, уменьшается электропроводность и пластичность, повышается прочность металла. Естественно, что такой металл по примесям не укладывается в рамках требований ГОСТ 11069-2001 на первичный алюминий и соответственно не находит потребителя, за исключением того, что используется для раскисления и дегазации стали [1–4].

Поэтому разработка прецизионных сплавов на основе такого металла путём его легирования третьим элементом является актуальной задачей, т.к. позволяет превратить некондиционный металл в нужный и полезный продукт для техники. Часто

© Азимов Х.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Джураева М.Ш., 2017

для блокировки отрицательного влияния железа алюминий и его сплавы легируют марганцем в количестве 0,5–1%. Это обусловлено тем, что в фазе $FeAl_3$ до 1/10 часть атомов железа может замещаться атомами марганца, и в результате образуется новая фаза $(Fe, Mn)Al_3$, кристаллы которого отличаются более компактной формой в отличие от игольчато-структурной фазы $FeAl_3$ [4–9].

Нами для изменения формы кристаллов интерметаллида в эвтектике ($\alpha-Al+FeAl_3$), т.е. ее модификации и разработке новых композиций, в качестве модифицирующего элемента был выбран металлические литий, бериллий и магний как поверхностно активные компоненты тройного сплава. Выбор исходного сплава $Al+2,18 \text{ мас.}\% Fe$ (АЖ2,18) объясняется тем, что данный состав соответствует эвтектике ($\alpha-Al+FeAl_3$) в системе $Al-Fe$, которая примыкает к алюминиевому углу системы и согласно разным источникам плавится при температуре 646–655°C с концентрацией эвтектической точки в пределах 1,7–2,3% Fe (по массе) [10, 11]. В работах [12–14] нами сообщалось о положительном влиянии добавок лития, бария и свинца на коррозионно-электрохимические характеристики сплава АЖ2,18.

Экспериментальная часть

Целью данной работы является сравнительное исследование анодного поведения сплава АЖ2,18, модифицированного литием, бериллием и магнием, в среде электролита $NaCl$. Для исследования анодного поведения сплава АЖ2,18, модифицированного указанными элементами, сплавы были получены с такими расчётом, чтобы охватить области растворимости легирующих компонентов в алюминии, т.е. исходный сплав АЖ2,18 легировался 0,01–0,5 мас.% литием, бериллием и магнием. Сплавы для коррозионно-электрохимических исследований получали в шахтной печи сопротивления типа СШОЛ с использованием двойных лигатур алюминия с железом (2,18%) и литием (ГОСТ 8774-75), магнием (ГОСТ 804-93) и бериллием (ГОСТ 23685-79). Применение лигатур даёт возможность уменьшить угар легирующих металлов, а также получить сплавы исследуемых систем при более низких температурах. Из полученных сплавов отливали в графитовую изложницу стержни диаметром 8 мм и длиной 140 мм. Нерабочая часть образцов изолировалась смолой (смесь 50% канифоли и 50% парафина). Рабочей поверхностью служил торец электрода. Перед погружением образца в рабочий раствор его торцевую часть зачищали наждачной бумагой, полировали, обез-

жировали, тщательно промывали спиртом и затем погружали в раствор электролита $NaCl$. Температура раствора в ячейке поддерживалась постоянной – 20°C с помощью термостата МЛШ-8.

Для изучения электрохимических свойств тройных сплавов применяли следующий метод исследования. Электрохимические испытания образцов проводили потенциостатическим методом на ПИ-50-1.1 со скоростью развёртки потенциала 2 мВ/с в среде электролита $NaCl$. Электродом сравнения служил хлорсеребряный, вспомогательным – платиновый [10, 11].

В качестве примера на **рис. 1** представлена полная поляризационная диаграмма для исходного сплава АЖ2,18 и сплава, содержащего 0,005 мас.% лития в среде электролита 3%-ного $NaCl$. Образцы потенциодинамически поляризовали в положительном направлении от потенциала, установившегося при погружении, до резкого возрастания тока в результате питтингообразования (**рис. 1**, кривая I). Затем образцы поляризовали в обратном направлении (**рис. 1**, кривая II) и по перечению кривых I и II определяли величину потенциала репассивации. Далее шли в катодную область до значения потенциала –1,1 В для удаления оксидных плёнок с поверхности электрода (**рис. 1**, кривая III) в результате подщелачивания при электродной поверхности. Наконец, образцы поляризовали вновь в положительном направлении (**рис. 1**, кривая IV) и из анодной кривой определяли основные электрохимические параметры.

На полученных таким образом поляризационных кривых определяли основные электрохимические характеристики сплавов: потенциал питтингообразования ($E_{п.о.}$), потенциал и ток коррозии ($E_{кор.}$ и $i_{кор.}$). Потенциал репассивации ($E_{р.п.}$) определялся графически как первый изгиб на обратном ходе анодной кривой или как точка пересечения прямого и обратного хода. Расчет тока коррозии как основной электрохимической характеристики процесса коррозии проводили по катодной кривой с учетом таффеловской наклонной $v_k = 0,12 \text{ В}$, поскольку в нейтральных средах процесс питтинговой коррозии алюминия и его сплавов контролируется катодной реакцией ионизации кислорода. Скорость коррозии, в свою очередь, является функцией тока коррозии, находимой по формуле

$$K = i_{кор.} \cdot k,$$

где $k = 0,335 \text{ г/А}\cdot\text{ч}$ для алюминия [10, 11].

Методика снятия поляризационных кривых сплавов в среде электролита $NaCl$ подробно описана в работах [12–17].

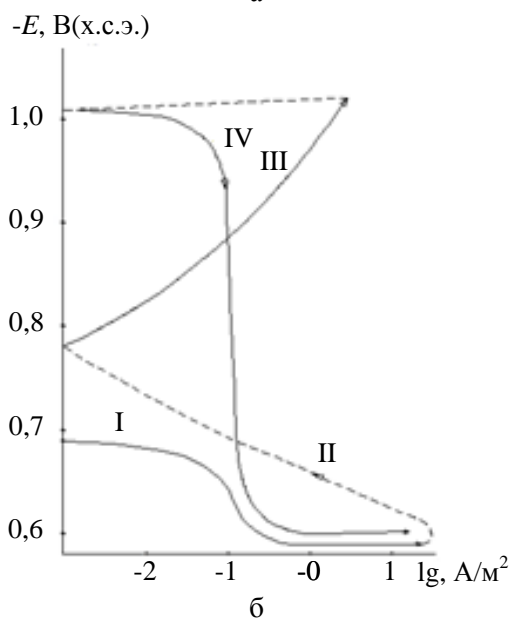
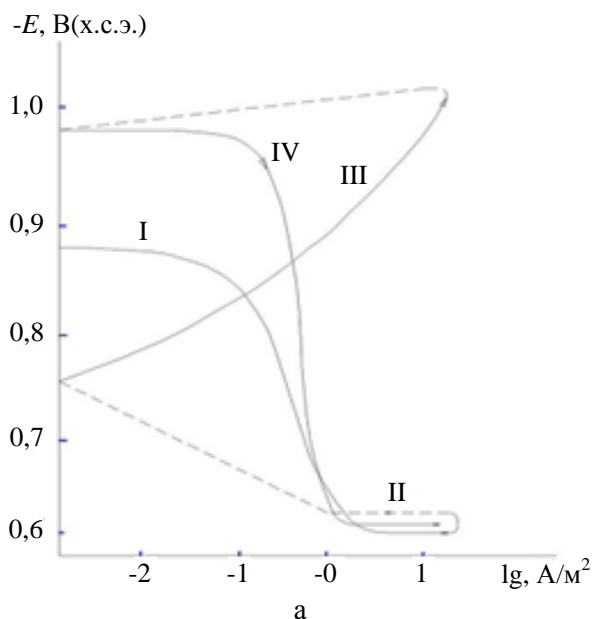


Рис. 1. Полная поляризационная (2 мВ/с) кривая сплавов АЖ2,18 (а) и АЖ2,18 с 0,005% Li (б) в среде электролита 3%-ного NaCl

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований представлены в табл. 1 и 2 и на рис. 1–3. На рис. 2 в качестве примера обобщена временная зависимость потенциала свободной коррозии сплава АЖ2,18, легированного литием в среде электролита NaCl различной концентрации. Результаты исследования свидетельствуют, что в первые минуты погружения образцов сплава в раствор электролита NaCl происходит резкое смещение потенциала свободной коррозии (стационарного потенциала) в положительную область. У сплавов с литием стабилизация потенциала свободной коррозии наблюдается в течение 30–40 мин. Ди-

намика изменения потенциала свободной коррозии у сплавов в среде электролита NaCl различной концентрации похожи (см. рис. 2).

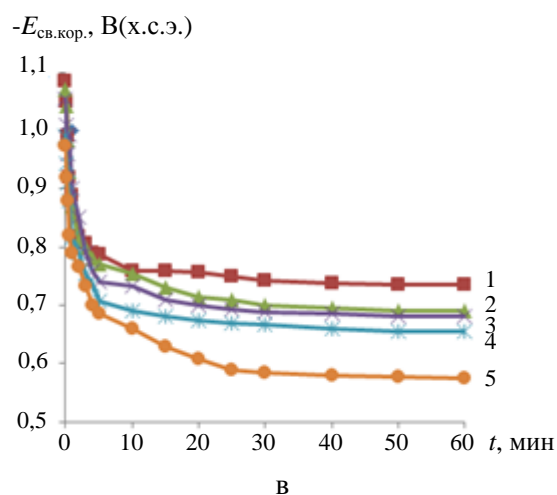
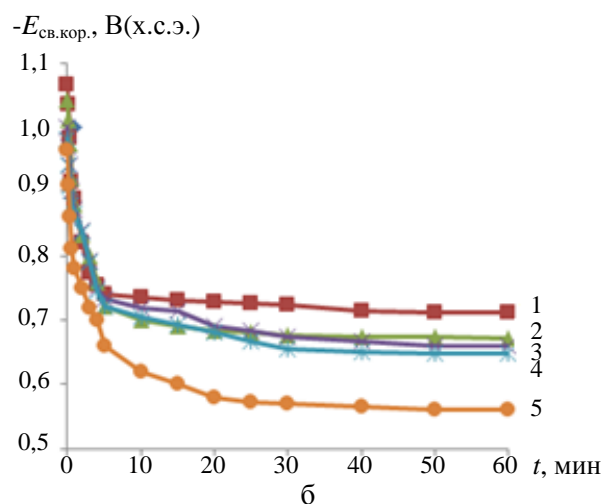
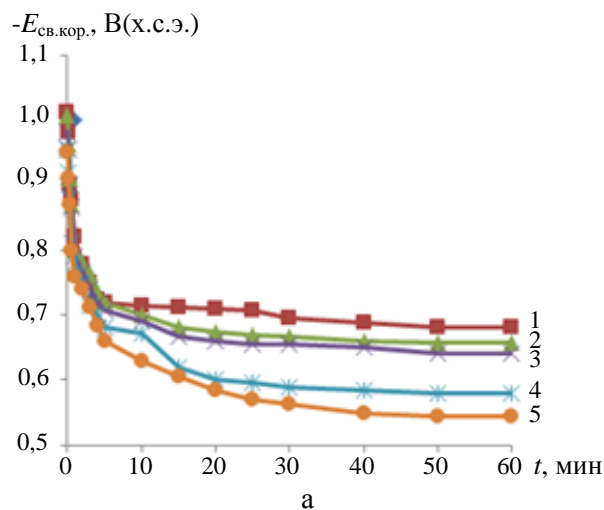


Рис. 2. Временная зависимость потенциала свободной коррозии ($-E_{св.кор.}$, В) сплава АЖ2,18, содержащего литий, мас. %: 0 (1), 0,005 (2), 0,01 (3), 0,05 (4), 0,1 (5) в среде электролита: 0,03% (а); 0,3% (б) и 3%-ного (в) NaCl

Исследования показывают, что добавки лития, бериллия и магния в пределах 0,005–0,5 мас.% способствуют смещению потенциала свободной коррозии (стационарного потенциала) в положительную область как в среде 3%-ного NaCl, так и в средах 0,3% и 0,03%-ного NaCl. При этом потенциалы питтингообразования и репассивации также смещаются в положительную область значений (см. **табл. 1**).

Скорость коррозии сплавов, содержащих 0,005–0,5% лития, бериллия и магния, в 1,5–2,0 раза меньше, чем у исходного алюминиевого сплава АЖ2,18 (см. **табл. 2**). Добавки лития, бериллия и магния к сплаву АЖ2,18 способствуют снижению скорости анодной коррозии, о чём свидетельствует смещение в более положительную область анодных ветвей потенциодинамических кривых модифицированных сплавов (см. **рис. 3**).

При этом по мере увеличения концентрации хлорид-иона в электролите NaCl скорость коррозии сплавов увеличивается независимо от содержания модифицирующего компонента – лития, бериллия и магния, что сопровождается смещением в положительную область потенциалов коррозии, питтингообразования и репассивации.

Таким образом, установлено положительное влияние модифицирующих добавок лития, бериллия и магния на анодные характеристики и скорости коррозии сплава АЖ2,18 в среде электролита NaCl. Установленные закономерности могут использоваться при разработке состава новых композиций сплавов на основе низкосортного некондиционного алюминия для нужд технологии противокоррозионной защиты.

Плотность тока коррозии и соответственно скорость коррозии сплавов систем АЖ2,18-Li (Be, Mg) с ростом концентрации хлорид-иона увеличивается. Данная зависимость характерна для всех сплавов, независимо от их состава и особенностей физико-химических свойств модифицирующего компонента. При переходе от сплавов, содержащих лития, к сплавам с бериллием наблюдается рост скорости коррозии, далее к сплавам с магнием – его уменьшение, что коррелируется со свойствами самых металлов. Для сплава алюминия с железом также характерен рост скорости коррозии с увеличением концентрации хлорид-иона в электролите (см. **табл. 2**).

Таблица 1

Потенциалы (х.с.э.) свободной коррозии ($-E_{\text{св.кorr.}}$, В) и питтингообразования ($-E_{\text{п.о.}}$, В) сплавов систем АЖ2,18-Li, (Be, Mg) в среде электролита NaCl

Среда	Содержание Li, Be, Mg в сплаве, мас.%	Сплавы с Li		Сплавы с Be		Сплавы с Mg	
		$-E_{\text{св.кorr.}}$	$-E_{\text{п.о.}}$	$-E_{\text{св.кorr.}}$	$-E_{\text{п.о.}}$	$-E_{\text{св.кorr.}}$	$-E_{\text{п.о.}}$
0,03% NaCl	–	0,680	0,500	0,680	0,500	0,680	0,500
	0,005	0,658	0,480	0,680	0,510	0,620	0,480
	0,01	0,640	0,465	0,650	0,500	0,600	0,460
	0,05	0,580	0,440	0,630	0,480	0,530	0,450
	0,1	0,545	0,439	0,600	0,460	0,500	0,420
	0,5	–	–	0,588	0,450	0,484	0,400
0,3% NaCl	–	0,712	0,520	0,712	0,520	0,712	0,520
	0,005	0,672	0,510	0,720	0,520	0,650	0,510
	0,01	0,660	0,500	0,680	0,515	0,610	0,480
	0,05	0,648	0,500	0,657	0,500	0,580	0,460
	0,1	0,560	0,470	0,633	0,500	0,540	0,450
	0,5	–	–	0,620	0,480	0,518	0,444
3% NaCl	–	0,735	0,585	0,735	0,585	0,735	0,585
	0,005	0,690	0,585	0,790	0,540	0,680	0,550
	0,01	0,682	0,540	0,770	0,525	0,620	0,540
	0,05	0,655	0,520	0,720	0,510	0,600	0,520
	0,1	0,576	0,500	0,700	0,510	0,560	0,500
	0,5	–	–	0,684	0,500	0,533	0,500

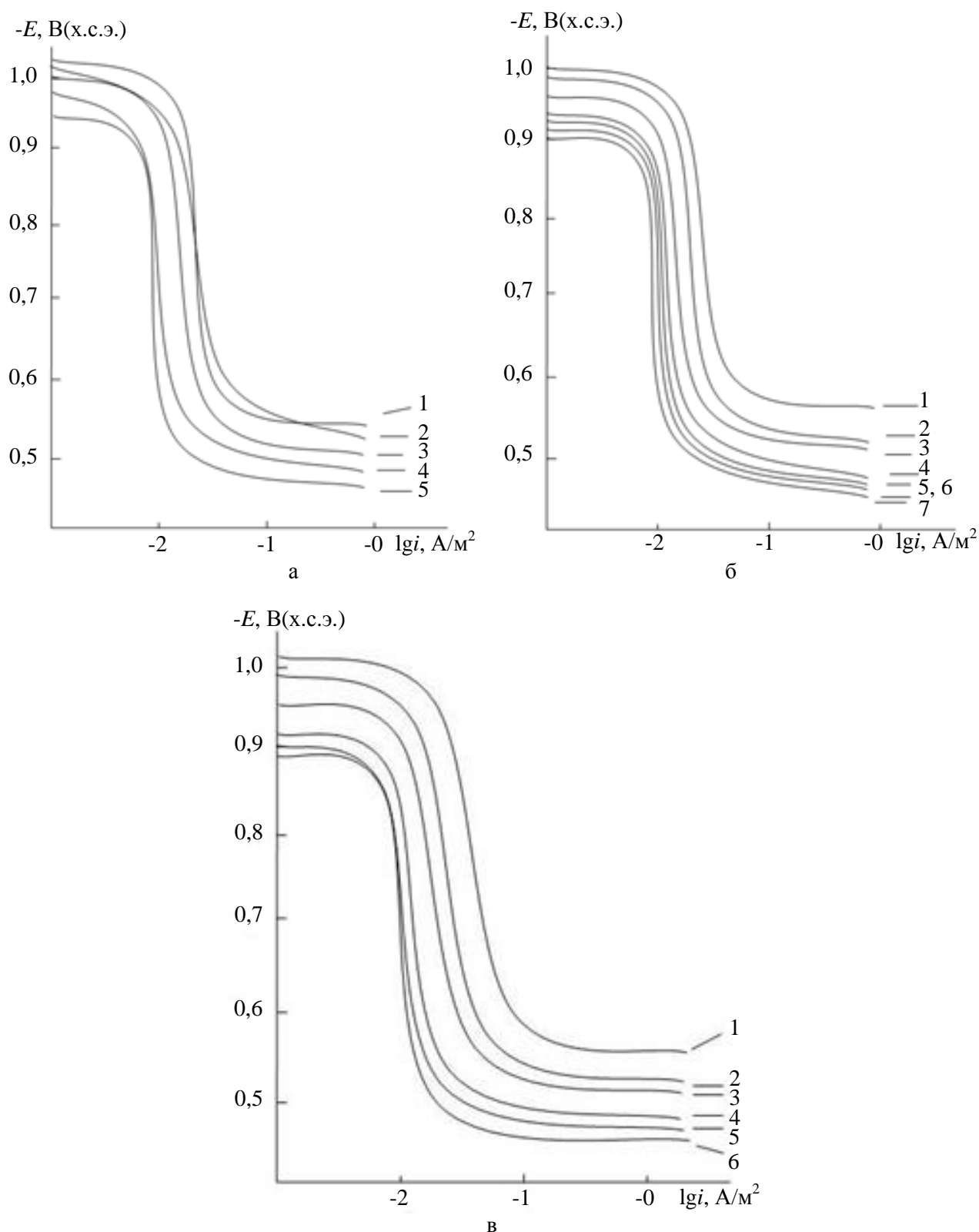


Рис. 3. Анодные ветви потенциодинамических кривых (2 мВ/с) сплавов систем АЖ2,18-Li (Be, Mg), содержащих литий (а), бериллий (б) и магний (в), мас. %: 0.0(1); 0.005(2); 0.01(3); 0.05(4); 0,1(5); 0.5(6), в среде электролита 3 %-ного NaCl

Зависимость скорости коррозии сплавов систем АЖ2,18%-Li (Be, Mg) в среде электролита NaCl

Среда	Содержание Li, Be, Mg в сплаве, мас.%	Скорость коррозии					
		Сплавы с Li		Сплавы с Be		Сплавы с Mg	
		$i_{корр} \cdot 10^{-2}$ А/м ²	$K \cdot 10^{-3}$ г/м ² ·ч	$i_{корр} \cdot 10^{-2}$ А/м ²	$K \cdot 10^{-3}$ г/м ² ·ч	$i_{корр} \cdot 10^{-2}$ А/м ²	$K \cdot 10^{-3}$ г/м ² ·ч
0,03% NaCl	–	0,92	3,1	0,92	3,1	0,92	3,1
	0,005	0,73	2,5	0,88	2,95	0,74	2,48
	0,01	0,65	2,2	0,74	2,48	0,68	2,28
	0,05	0,52	1,8	0,69	2,31	0,60	2,01
	0,1	0,48	1,6	0,62	2,07	0,52	1,74
	0,5	–	–	0,60	2,01	0,50	1,67
0,3% NaCl	–	1,10	3,4	1,10	3,4	1,10	3,7
	0,005	0,86	2,9	0,98	3,28	0,82	2,75
	0,01	0,72	2,5	0,86	2,88	0,70	2,35
	0,05	0,63	2,2	0,74	2,48	0,63	2,11
	0,1	0,58	2,0	0,70	2,35	0,54	1,81
	0,5	–	–	0,68	2,28	0,51	1,71
3% NaCl	–	1,12	4,1	1,12	4,1	1,12	4,1
	0,005	0,93	3,2	1,10	3,68	0,86	2,88
	0,01	0,88	3,0	0,96	3,22	0,80	2,68
	0,05	0,74	2,5	0,84	2,81	0,68	2,28
	0,1	0,60	2,3	0,76	2,55	0,56	1,87
	0,5	–	–	0,70	2,35	0,53	1,77

Анодные ветви потенциодинамических кривых сплавов систем Al+2,18%Fe-Li (Be, Mg) в среде 3%-ного NaCl (см. рис. 3) показывают, что кривые, относящиеся к модифицированным сплавам, располагаются левее кривой исходного сплава АЖ2,18, т.е. скорость анодной коррозии модифицированных сплавов несколько меньше, чем у исходного сплава АЖ2,18 во всех исследованных средах. Положительное действие лития, бериллия и магния на анодные свойства сплава АЖ2,18 не может объясняться только увеличением истинной поверхности анода или уплотнением защитного фазового слоя окислов малорастворимыми продуктами окисления. Стойкость алюминиево-железовых сплавов также зависит от изменения и модифицирования его структуры при легировании, т.е. от величины кристаллов сплавов [18]. Как известно, модификаторами структуры сплава могут служить металлы, имеющие малую межатомную связь и, следовательно, низкую температуру плавления, малую прочность и твердость [19, 20].

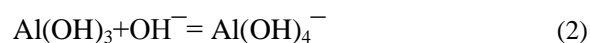
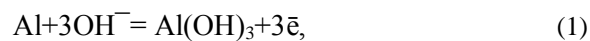
Таким образом, установлено, что модифицирование сплава АЖ2,18 литием, бериллием и магнием до 0,5 мас.% повышает его анодную устойчивость в два раза в среде электролита NaCl. При этом с ростом концентрации модифицирующего компонента отмечается смещение в положительную область потенциалов свободной

коррозии, питтингообразования и репассивации. С увеличением концентрации хлорид-иона указанные потенциалы сплавов уменьшаются, скорость коррозии увеличивается.

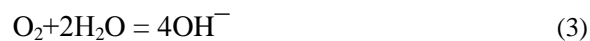
Заключение

Как известно, наиболее опасным видом коррозии алюминия и его сплавов является питтинговая коррозия, которую вызывают хлорид-ионы окружающей среды. Этим и объясняется выбор раствора NaCl в качестве коррозионной среды для электрохимических и коррозионных испытаний.

Растворение алюминия в нейтральных средах протекает по следующим реакциям:



Лимитирующий этап процесса определяется скоростью доставки ионов OH^- к поверхности электрода. Кислород выполняет роль деполяризатора в азрированных нейтральных растворах. На границе раздела металл-раствор протекает его восстановление по реакции



Скорость коррозии в конечном счёте определяется процессом диффузии к электроду растворённого в электролите кислорода. Данный этап

является лимитирующим. При взаимодействии металла с ионами OH^- на поверхности осаждается гидратированный оксид с общей формулой $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ как промежуточный продукт их взаимодействий. Оксид и гидроксид алюминия различной модификации хорошо растворимы в щелочных и кислых средах, но практически нерастворимы в нейтральных растворах, именно этими соображениями объясняется область практического использования алюминия и его сплавов в жидких средах близкие к нейтральным. Оксидные плёнки на алюминии проявляют высокое защитное действие в таких растворах, а равномерная коррозия алюминия и его сплавов, как правило, невелика и протекает на отдельных дефектах оксидной плёнки [10, 11].

Образующийся на алюминии в нейтральных средах пассивирующий оксид имеет низкую электронную проводимость. Плёнка тормозит практически полностью не только анодную реакцию растворения металла, но и сопряжённое катодное восстановление растворённого в электролите кислорода. Формирующиеся на алюминиевых сплавах оксидные плёнки более проводимые. Этим объясняется относительно высокая коррозия алюминиевых сплавов по сравнению с чистым алюминием [10,11].

Применительно к нашим исследованиям следует отметить, что добавки лития, бериллия и магния к исходному сплаву АЖ2,18, оказывая модифицирующее влияние, существенно изменяют форму кристаллов интерметаллида FeAl_3 от игольчатого к шаровидному, также сокращается их размер. Результатом этого является повышение коррозионной стойкости модифицированных сплавов в 2 раза по сравнению с исходным сплавом. При этом значительно затормаживается анодный процесс коррозии в результате улучшения структуры оксидных пассивных плёнок, уменьшение его электронной проводимости (см. **рис. 3**). Добавки также уменьшают динамику процесса питтинговой коррозии сплавов. Потенциал питтингообразования облагораживается, что способствует уменьшению плотности зарождающихся питтинговых очагов. Так, если у исходного сплава АЖ2,18 величина $E_{\text{п.о}}$ равняется $-0,585$ В, то у сплава, содержащего 0,1 мас.% лития, $E_{\text{п.о}}$ составляет $-0,500$ В в той же среде. По мере перехода к более разбавленным средам электролита NaCl разница между $E_{\text{п.о}}$ исходного сплава и сплава с 0,1 мас.% литием уменьшается и составляет: в среде 3%-ного NaCl $-0,085$ В; в среде 0,3%-ного NaCl $-0,050$ В и в среде 0,03%-ного NaCl $-0,060$ В.

Список литературы

1. Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы. Самара: Самарск. гос. техн. ун-т, 2013. 81 с.
2. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение). Справочник / под ред. Фридляндера И.Н. К.: КОМИТЕХ, 2005. 365 с.
3. Мондальфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1973. 639 с.
4. Красноярский В.В., Сайдалиев Н.Р. Коррозионно-электрохимические свойства сплавов алюминия с железом в нейтральных растворах // Защита от коррозии и окружающей среды. 1991. Вып. 3. С. 14–19.
5. Влияние технологических факторов на образование дефектов структуры в крупнотоннажных слитках из алюминиевых сплавов серии 1XXX / Фролов В.Ф., Беляев С.В., Губанов И.Ю., Безруких А.И., Костин И.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №2. С. 25–31.
6. Основные виды и области применения наноструктурированного высокопрочного листового проката / М.В. Чукин, В.М. Салганик, П.П. Полецков [и др.]. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4. С. 41–44.
7. Chen X.-G. Growth mechanisms of intermetallic phases in DC cast AA1XXX alloys // Essential Readings in Light Metals. Volume 3. Cast Shop for Aluminum Production. 2013, pp. 460–465.
8. Grange D.A. Microstructure control in ingots of aluminium alloys with an emphasis on grain refinement // Essential Readings in Light Metals. Volume 3. Cast Shop for Aluminum Production. 2013, pp. 354–365.
9. Geoffrey K. Sigworth Fundamentals of Solidification in Aluminum Castings // International Journal of Metalcasting. 2014. Vol. 8. Iss. 1. P. 7–20.
10. Умарова Т.М., Ганиев И.Н. Анодные сплавы алюминия с марганцем, железом и редкоземельными металлами. Душанбе: Дониш, 2009. 232 с.
11. Ганиев И.Н., Умарова Т.М., Обидов З.Р. Коррозия двойных алюминиевых сплавов в нейтральных средах. Издательский дом LAP LAMBERT Academic Publishing. 2011. 198 с.
12. Потенциодинамическое исследование сплава $\text{Al}+2,18\%\text{Fe}$, модифицированного литием в среде электролита NaCl / Азимов Х.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Джайлоев Дж.Х. // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2016. Т. 59, №2. С. 74–79.
13. Потенциодинамическое исследование сплава $\text{Al}+2,18\%\text{Fe}$, легированного барием / Джайлоев Дж.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Азимов Х.Х. // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2014. Т. 57, №2. С. 97–98.
14. Раджабалиев С.С., Ганиев И.Н., Амонов И.Т. Влияние свинца на анодное поведение сплава $\text{Al}+2,18\%\text{Fe}$ // Вопросы материаловедения. 2016. №2 (86). С. 147–152.
15. Анодное поведение сплава $\text{Al}+2,18\%\text{Fe}$, легированного кальцием в среде электролита NaCl / Джайлоев Дж.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Азимов Х.Х. // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2015. Т. 58, №12. С. 38–42.
16. Потенциодинамическое исследование сплава $\text{Al}+6\%\text{Li}$ с

- итрием в среде электролита NaCl / Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Норова М.Т., Ганиева Н.И., Irene Calliaї // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №2. С. 95–100.
17. Потенциодинамическое исследование сплава АЖ4.5, легированного свинцом в среде электролита NaCl / Одинаев Ф.Р., Ганиев И.Н., Сафаров А.Г., Якубов У.Ш. // Обработка сплошных и слоистых материалов 2016. №2 (45). С. 64–68.
18. Семенченко В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. М.: Изд-во науч.-техн. лит., 1956. 135 с.
19. Модифицирование силуминов стронцием / Ганиев И.Н., Пархутик Г.А., Вахобов А.В., Куприянова И.Ю. Минск: Наука и техника, 1985. 143 с.
20. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.

Поступила 25.02.17

Принята в печать 07.06.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-45-53>

A COMPARATIVE STUDY OF THE ANODIC BEHAVIOUR OF THE ALLOY AZh2,18 INOCULATED WITH LITHIUM, BERYLLIUM AND MAGNESIUM IN NaCl

Kholiknazar H. Azimov – Postgraduate Student

Nikitin Institute of Chemistry of the Republic of Tajikistan. E-mail: kholikazim@mail.ru

Izatullo N. Ganiev – D.Sc. (Chem.), Professor, Head of Laboratory

Nikitin Institute of Chemistry, member of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. E-mail: ganiev48@mail.ru

Ikhom T. Amonov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Tajik Technical University. E-mail: ilhomamonov@mail.ru

Mijgona Sh. Juraeva – Postgraduate Student

Nikitin Institute of Chemistry of the Republic of Tajikistan. E-mail: mijgona88@mail.ru

Abstract

It is a fact that, because of its poor performance characteristics, aluminium with high concentrations of iron, silicon and other impurities fails to find an industrial application. Hence, the development of new aluminium-based alloys appears to be a very important task. One of the promising compositions observed on the aluminium-iron diagram is a eutectic (α -Al+Al₃Fe), which, having a minimum crystallization interval, corresponds to 2.18%(wt.) of iron content. This composition was taken as a model alloy and was inoculated with lithium, beryllium, and magnesium. The objective of this work is to establish what effect the above additives can produce on the corrosion resistance and the electrochemical behaviour of the model alloy of AZh2,18 in the NaCl medium. To achieve this objective, the anodic behaviour of the AZh2,18 alloy inoculated with the above metals was studied on the potentiostat PI-50.1.1 using the potentiostatic method in a potentiodynamic mode with the potential sweep speed of 2 mV/s. It is shown that, in the NaCl electrolyte, as the inoculant concentration increases, the free corrosion potential (or, fixed potential) of alloys travels in the direction of increase of the coordinate axis, whereas as the concentration of chloride ion rises, the fixed potential of alloys travels in the direction of decrease of the coordinate axis. As the chloride ion concentration in the electrolyte increases, the pitting and repassivation potentials of alloys drop. A higher concentration of inoculants in the original AZh2,18 alloy leads to rising pitting and repassivation potentials in all the media regardless of the chloride ion concentration. As the chlo-

ride ion concentration rises, the corrosion current density and, correspondingly, the corrosion rate of the alloys increase, whereas inoculants cut them down twice. These findings can be used for the development of new aluminium-iron alloys applicable in multiple industries.

Keywords: AZh2,18 alloy, lithium, beryllium, magnesium, potentiostatic method, electrochemical corrosion, anodic behaviour, corrosion potential, corrosion rate.

References

1. Luts A.R., Suslina A.A. *Alyuminiy i ego splavy* [Aluminium and aluminium alloys]. Samara: Samara State Technical University, 2013, 81 p. (In Russ.)
2. Beletsky V.M., Krivov G.A. *Alyuminiyevye splavy (Sostav, svoystva, tekhnologiya, primeneniye)* [Aluminum alloys (Composition, properties, technology, application)]. Ed. by I.N. Fridlyander. Kiev: KOMITEKH, 2005, 365 p.
3. Mondolfo L.F. *Struktura i svoystva alyuminiyevykh splavov* [Structure and properties of aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 639 p. (In Russ.)
4. Krasnoyarsky V.V., Saydaliev N.R. The corrosion and electrochemical properties of aluminium-iron alloys in neutral solutions. *Zashchita ot korrozii i okruzhayushchey sredy* [Corrosion and environmental load protection]. Moscow: 1991, vol. 3, pp. 14–19.
5. Frolov V.F., Belyaev S.V., Gubanov I.Yu., Bezrukikh A.I., Kostin I.V. Influence of process factors on the formation of structural defects in heavy 1XXX series aluminium alloy ingots. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik

- of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 2, pp. 25–31.
6. Chukin M.V., Salganik V.M., Poletskov P.P. et al. Main types of nanostructured high-strength steel sheets and their application. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 4, pp. 41–44.
 7. Chen X.-G. Growth mechanisms of intermetallic phases in DC cast AA1XXX alloys. Essential Readings in Light Metals. Volume 3. Cast Shop for Aluminum Production. 2013, pp. 460–465.
 8. Grange D.A. Microstructure control in ingots of aluminium alloys with an emphasis on grain refinement. Essential Readings in Light Metals. Volume 3. Cast Shop for Aluminum Production. 2013, pp. 354–365.
 9. Geoffrey K. Sigworth Fundamentals of Solidification in Aluminum Castings. International Journal of Metalcasting. 2014, vol. 8, iss. 1, pp. 7–20.
 10. Umarova T.M., Ganiev I.N. *Anodnye splavy alyuminiya s margantsem, zhelezom i redkozemelnyimi metallami* [Aluminium anode alloys with manganese, iron and rare earth metals]. Dushanbe: Donish, 2009, 232 p.
 11. Ganiev I.N., Umarova T.M., Obidov Z.R. *Korroziya dvoynykh alyuminiyevykh splavov v neytralnykh sredakh* [Corrosion of binary aluminium alloys in neutral media]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, 198 p.
 12. Azimov Kh.Kh., Ganiev I.N., Amonov I.T., Djayloev Dj.Kh. Potentiodynamic study of the alloy Al+2.18%Fe inoculated with lithium in the NaCl medium. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of Russian Universities. Chemistry and chemical technology], 2016, vol. 59, no. 2, pp. 74–79. (In Russ.)
 13. Djayloev Dj.Kh., Ganiev I.N., Amonov I.T., Azimov Kh.Kh. Potentiodynamic study of the alloy Al+2.18%Fe doped with barium. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of Russian Universities. Chemistry and chemical technology], 2014, vol. 57, no. 2, pp. 97–98. (In Russ.)
 14. Radjabaliev S.S., Ganiev I.N., Amonov I.T. The effect of lead on the anodic behaviour of the alloy Al+2.18%Fe. *Voprosy materialovedeniya* [Problems of materials engineering], 2016, no. 2 (86), pp. 147–152. (In Russ.)
 15. Djayloev Dj.Kh., Ganiev I.N., Amonov I.T., Azimov Kh.Kh. Anodic behaviour of the alloy Al+2.18%Fe doped with calcium in the NaCl medium. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of Russian Universities. Chemistry and chemical technology], 2015, vol. 58, no. 12, pp. 38–42. (In Russ.)
 16. Nazarov Sh.A., Ganiev I.N., Norova M.T., Ganieva N.I. Irene Calliari. Potentiodynamic study of the alloy Al+6% Li with yttrium in the NaCl medium. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 2, pp. 95–100. (In Russ.)
 17. Odinaev F.R., Ganiev I.N., Safarov A.G., Yakubov U.Sh. Potentiodynamic study of the alloy AZh4.5 doped with lead in the NaCl medium. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov* [Processing of solids and laminates], 2016, no. 2 (45), pp. 64–68. (In Russ.)
 18. Semenchenko V.K. *Poverkhnostnye yavleniya v metallakh i splavakh* [Surface phenomena in metals and alloys]. Moscow, 1956, 135 p. (In Russ.)
 19. Ganiev I.N., Parkhutik G.A., Vakhobov A.V., Kupriyanova I.Yu. *Modifitsirovanie siluminov strontsiem* [Modification of silumins with strontium]. Minsk: Science and technology. 1985, 143 p. (In Russ.)
 20. Maltsev M.V. *Modifitsirovanie struktury metallov i splavov* [Structural modification of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 280 p. (In Russ.)

Received 25/02/17
Accepted 07/06/17

Образец для цитирования

Сравнительное исследование анодного поведения сплава АЖ2,18, модифицированного литием, бериллием и магнием, в среде электролита NaCl / Азимов Х.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Джураева М.Ш. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 45–53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-45-53>

For citation

Azimov Kh.H., Ganiev I.N., Amonov I.T., Juraeva M.Sh. A comparative study of the anodic behaviour of the alloy AZh2,18 inoculated with lithium, beryllium and magnesium in NaCl. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 45–53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-45-53>

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 658.5

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-54-61>

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ОТРАСЛИ

Мезин И.Ю.¹, Гун И.Г.¹, Лимарев А.С.¹, Ушаков М.Ю.², Стеблянко В.Л.¹, Федосеев С.А.³¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия² ОАО «РЖД», Магнитогорск, Россия³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация

В настоящее время динамично развивается и имеет инвестиционную привлекательность рынок продукции железнодорожного назначения. Это обусловлено тем, что для удовлетворения потребностей экономики в железнодорожных перевозках требуется качественно новая железнодорожная техника и инфраструктура. На сегодняшний день обеспечение качества компонентов рельсовых скреплений для верхнего строения железнодорожного пути и другой продукции для железнодорожного транспорта осуществляется на основе стандарта ISO 9001, который не в полной мере учитывает требования железнодорожной отрасли. Целью представленной статьи является освещение вопросов обеспечения качества продукции железнодорожного назначения, обладающей своими специфическими особенностями, на основе анализа литературных источников и нормативных документов. Разработка новых требований для железнодорожной отрасли обусловлена тем, что для эффективного ведения бизнеса и оказания услуг, соответствующих требованиям потребителей и предприятий, осуществляющим перевозки, а также производство продукции железнодорожного назначения, приходится решать широкий спектр сложных и противоречивых задач. Это послужило основой для разработки современной системы менеджмента бизнеса (СМБ), которая нормативно закреплена в стандарте IRIS. В представленной статье рассматривается возможность улучшения процессов производства на основе применения стандарта IRIS. Среди основных целей данного стандарта – обеспечение высокого уровня качества продукции для железнодорожной отрасли. Особенностью стандарта IRIS является оценка деятельности предприятия, основанная на системе начисления баллов. В статье также представлен общий структурный план внедрения СМБ, отвечающий требованиям IRIS, применительно к предприятию, производящему элементы железнодорожных рельсовых скреплений.

Ключевые слова: система менеджмента бизнеса, продукция железнодорожного назначения, сертификация продукции, управление качеством продукции.

Введение

Российский рынок продукции железнодорожного назначения динамично развивается и имеет инвестиционную привлекательность. Железнодорожные перевозки имеют особое стратегическое значение для России. Они являются связующим звеном единой экономической системы, обеспечивают стабильную деятельность промышленных предприятий, своевременный подвоз жизненно важных грузов в самые отдаленные уголки страны и являются доступным транспортом для граждан. Для удовлетворения потребностей экономики в железнодорожных перевозках требуется качественно новая железнодорожная техника и инфраструктура, создание которой возможно только на основе инновационных подходов и признанных методов управления бизнесом [1].

В настоящее время вопрос повышения качества компонентов рельсовых скреплений для верхнего строения железнодорожного пути осуществляется на основе перехода от общепринятой практики выстраивания системы менеджмента качества предприятия – стандарта ISO 9001 к более узкому, отражающему именно требования железнодорожной отрасли, – стандарту IRIS (International Railway Industry Standard). Обзор периодических изданий показал, что вопрос применения стандарта IRIS в большей степени отражен для предприятий-производителей мотор-вагонного и подвижного состава, и варианты применения данного стандарта на предприятиях, выпускающих компоненты для верхнего строения пути, отсутствуют. Обеспечение безопасности перевозок пассажиров и грузов на железной дороге во многом обусловлено качеством верхнего строения железнодорожного пути и отдель-

© Мезин И.Ю., Гун И.Г., Лимарев А.С., Ушаков М.Ю., Стеблянко В.Л., Федосеев С.А., 2017

ных его компонентов в частности. С целью обеспечения возможности перехода был проведен анализ требований стандартов ISO 9001 и IRIS. На его основе предложен примерный план внедрения Системы менеджмента бизнеса на предприятиях-производителях метизной продукции железнодорожного назначения, основанной на требованиях стандарта IRIS.

Материалы и методы исследования

Наличие действующей системы менеджмента качества является обязательным требованием, выдвигаемым потребителями продукции промышленного назначения. Это обусловлено тем, что потребители и бизнес-партнеры уверены в стабильности качества и безопасности продукции, выпускаемой предприятиями с четко выстроенной и функционирующей системой менеджмента качества [2]. Любая система менеджмента качества возникает, как правило, на основе уже существующих систем. На сегодняшний день модель, базирующаяся на стандартах ISO 9000, является наиболее часто используемой при построении системы менеджмента качества предприятий в различных отраслях промышленности. Широкое распространение такая модель получила благодаря своей универсальности [3]. Недостатком ее является неспособность учесть специфические требования для конкретной области производства. Это привело к появлению целого ряда рекомендаций по построению систем менеджмента качества в конкретной отрасли. В аэрокосмической отрасли используется AS 9100, при производстве автомобилей и их компонентов – ISO/TS 16949, в области информационных технологий – ISO 20000 и т.д. Для учета ряда специфических особенностей и требований к продукции в железнодорожной отрасли был разработан международный стандарт железнодорожной промышленности IRIS.

Среди особенностей продукции железнодорожного назначения можно выделить следующие [4]:

1. Ограниченные партии выпускаемой продукции.
2. Высокие требования к безопасности продукции.
3. Длительные сроки реализации проектов.
4. Длительный жизненный цикл продукции.
5. Работа в тяжелых условиях.
6. Противоречивые требования для подвижного состава и отдельных его компонентов.

Разработка новых требований для железнодорожной отрасли обусловлено тем, что для эффективного ведения бизнеса и оказания услуг, соответствующих требованиям потребителей, предприятиям, осуществляющим перевозки, производство

продукции железнодорожного назначения приходится решать ряд задач, не охватываемых общими концепциями стандартов серии ISO 9000. В частности, к таким требованиям можно отнести [5]:

1. Управление измерениями.
2. Менеджмент конфигураций.
3. Менеджмент морального износа.
4. Обеспечение безопасности, надежности и ремонтпригодности.
5. Оценка стоимости жизненного цикла продукции.
6. Особые государственные требования.
7. Валидация продукции.
8. Различия в требованиях к продукции с одинаковыми функциями.

Особое значение для обеспечения надежности и качества железнодорожных перевозок играют производители подвижного состава и компонентов инфраструктуры. В связи с этим при производстве продукции железнодорожного назначения производители должны учитывать, наряду с требованиями заказчиков (операторов), требования конечных потребителей железнодорожных перевозок. Как правило, конечными потребителями железнодорожных перевозок являются граждане для передвижения в нужном направлении или торговые и промышленные компании для доставки грузов к месту назначения. В результате этого сложилась устойчивая цепочка поставок продукции железнодорожного назначения, включающая операторов, системных интеграторов и производителей компонентов (рис. 1).



Рис. 1. Цепь поставок продукции железнодорожного назначения

Как показывает мировой опыт, предприятия, выпускающие подвижной состав и компоненты инфраструктуры, развиваются неравномерно, что приводит к возникновению ряда проблем в цепочке поставок:

- несоответствие ожиданий возможностей оператора в отношении уровня комфорта, скорости и безопасности перевозочных услуг в железнодорожной отрасли;
- отсутствие возможности у производителей

полностью удовлетворить требования по вопросам обеспечения качества подвижного состава и компонентов инфраструктуры;

- большое количество контрольных операций, увеличивающих издержки.

С целью устранения этих проблем было принято решение по объединению различных ассоциаций и европейских производителей в единую ассоциацию UNIFE – европейская ассоциация железнодорожной промышленности. На базе UNIFE была создана рабочая группа по разработке и развитию стандарта по управлению бизнесом (группа IRIS), базирующегося на основных положениях стандарта ISO 9001. Указанный стандарт должен учитывать специфические для железнодорожной промышленности требования. Результатом деятельности этой группы стала первая редакция стандарта IRIS REV.00, вышедшая в 2006 году. Выход данного стандарта был поддержан крупнейшими участниками железнодорожного рынка, такими как: Alstom Transport, AnsaldoBreda, Bombardier, Siemens, Knorr-Bremse, HARTING, VOITH, London Undefrond, SWISS RAIL, ACRI, AGORIA, DANISH RAILWARE GROUP, ОАО «РЖД» [6].

Основными целями стандарта IRIS являются [7]:

- улучшение качества и надежности продукции железнодорожного назначения;
- снижение количества аудитов, снижение затрат, повышение эффективности проверок и всеобщее признание результатов аудитов;
- повышение эффективности по всей цепочке поставок продукции железнодорожного назначения;
- акцент предприятий на устойчивом развитии;
- повышение эффективности совместной работы производителей, системных интеграторов и операторов.

Несмотря на то, что в основе стандарта IRIS положены требования ISO 9001, эти стандарты имеют существенные различия, что позволяет учитывать специфические требования железнодорожной промышленности. В частности, в стандарте IRIS делается акцент на следующих вопросах, которые отсутствуют в стандарте ISO 9001 [8]:

- менеджмент знаний;
- менеджмент проектов с несколькими производственными площадками;
- бизнес-план (стратегия);
- менеджмент взаимоотношений с потребителями;
- обучение персонала;
- менеджмент при проведении тендеров;
- менеджмент цепочки поставок;

- составление графика производства;
- производственная документация;
- управление изменениями процесса производства;
- управление оборудованием и инструментами;
- менеджмент проекта;
- контроль первого изделия;
- ввод продукции в эксплуатацию/сервисное обслуживание;
- RAMS/LCC;
- менеджмент морального износа продукции;
- управление изменениями;
- управление несоответствующими процессами;
- разрешение от потребителя на отклонение.

В стандарте IRIS отражены требования к общей системе менеджмента бизнеса, в которую интегрированы все процессы. Существенным отличием требования этого стандарта от стандарта ISO 9001 является необходимость документального оформления всех процессов. В стандарте IRIS установлено 25 обязательных и 30 рекомендуемых процессов, а также 16 обязательных и 5 рекомендуемых процедур. Эффективность функционирования процессов оценивается с помощью KPI (ключевых показателей деятельности) [9].

При проведении сертификации орган по сертификации оценивает уровень зрелости системы менеджмента предприятия по 100-балльной шкале, вычислив его как процентное отношение (набранное число баллов/максимально возможное число баллов). Для получения сертификата IRIS предприятию достаточно набрать около 50% (среднестатистически) при условии отсутствия несоответствий и закрытия всех применимых нокаут-вопросов. Если предприятие набирает более 75%, то к нему применяется так называемый компенсирующий и поощряющий подход: главные разделы IRIS, по которым предприятие набирает более 80%, не будут проверяться аудиторами при надзорных аудитах до ресертификационного аудита [10].

Сертификат IRIS может быть отозван органом по сертификации в случае наличия серьезных замечаний от потребителей, учитываются и результаты предыдущих проверок. Также может быть понижен рейтинг (уменьшение оценочного балла в пределах выше критического значения) [11].

Учет специфических требований железнодорожной промышленности в стандарте IRIS позволяет добиваться повышения качества продукции железнодорожного назначения. Также следует отметить, что стандарт для железнодорожной отрасли является более объемным и предъявляет более жесткие требования по сравнению со стандартом ISO 9001 (рис. 2). Для большинства процессов и процедур даже минимальные требования стандарта IRIS значительно более обширны.



Рис. 2. Сравнение требований стандартов IRIS и ISO 9001[11]

Особенностью стандарта IRIS является оценка, основанная на применении системы начисления баллов для оценки деятельности предприятия. В ходе проведения аудитов используется программное обеспечение Audit Tool, оценка производится в соответствии с системой начисления баллов, основанной на чек-листе IRIS. В чек-лист входит 259 вопросов. В IRIS акцентируется внимание на обязательном выполнении организацией так называемых нокаут-вопросов:

- Система менеджмента качества.
- Проектирование и разработка.
- Входные данные для проектирования и разработки.
- Валидация проекта и разработки. Одобрение проекта.
- Валидация процессов производства и обслуживания.
- Менеджмент проекта.
- Менеджмент качества.
- Контроль первого изделия.
- Ввод продукции в эксплуатацию. Сервисное обслуживание.
- Управление измерениями.
- Управление несоответствующим процессом.

Из всех 12 нокаут-вопросов от одного до шести нокаут-вопросов могут быть не применимы к

организациям определенного типа. При обработке чек-листов выполнение каждого требования стандарта IRIS оценивается с использованием 5-балльной системы оценки:

- 0 – неудовлетворительно;
- 1 – недостаточно;
- 2 – удовлетворительно;
- 3 – хорошо;
- 4 – отлично.

Результаты оценки вводятся в базу данных поставщиков UNIFE (электронный портал IRIS), где они становятся доступны для всех потребителей (в том числе и потенциальных) подвижного состава и железнодорожных комплектующих и материалов. Таким образом, уровень соответствия предприятия требованиям IRIS является общедоступным (не конфиденциальным) [12].

Применение стандарта IRIS позволяет добиться создания общепризнанной системы оценки организаций, работающих в железнодорожной промышленности, с единым языком (английским), единым подходом к оценке, признанием результатов аудитов всеми заинтересованными сторонами. Применение требований этого стандарта позволяет создать систему менеджмента бизнеса, обеспечивающую возможность проведения постоянных улучшений и, как следствие, предотвращение и сокращение дефектов в цепочке поставок [13].

В Российской Федерации концепция развития ОАО «РЖД» до 2030 г. направлена на стратегическое управление качеством продукции, за счет выстраивания модели бизнеса с предприятиями-поставщиками продукции железнодорожного назначения, сертифицированными на соответствие требований стандарта IRIS. В плане внедрения установлены сроки приведения систем менеджмента бизнеса в соответствие требованиям IRIS на предприятиях, выпускающих продукцию железнодорожного назначения. Поэтому в настоящее время все больше поставщиков продукции для железнодорожной отрасли вынуждены внедрять системы менеджмента бизнеса, удовлетворяющие требованиям стандарта IRIS [14].

В актуальной версии стандарта IRIS область сертификации продукции охватывает элементы верхнего строения железнодорожного пути, в частности рельсовые скрепления. Учитывая курс, взятый ОАО «РЖД» на повышение качества продукции, поставляемой на сеть дорог, предприятиям, производящим элементы рельсовых скреплений, необходимо привести свои системы менеджмента качества в соответствие с требованиями стандарта IRIS (пройти сертификацию). В настоящее время системы менеджмента качества крупнейших предприятий-производителей элементов рельсовых скреплений сертифицированы на соответствие требованиям ISO 9001 [15, 16].

Результаты исследования

Для подготовки и успешной сертификации системы менеджмента качества предприятий-производителей компонентов рельсовых скреплений на соответствие требованиям стандарта IRIS первым шагом должна быть регистрация на портале IRIS. Это позволит предприятиям заявить о своих намерениях и готовности совершенствования своей СМК до ее соответствия требованиям стандарта для железнодорожной промышленности. Регистрация на портале даст предприятиям возможность получить больше информации о требованиях по сертификации, аккредитованных аудиторских и консалтинговых организациях, информационную поддержку и ответы на возникающие вопросы.

Общий структурный план внедрения СМБ, отвечающий требованиям IRIS, на предприятиях-производителях элементов рельсовых скреплений можно представить следующим образом:

1. Подготовка (консалтинговая организация):

- Оценочный аудит для определения степени соответствия деятельности предприятия требованиям стандарта IRIS.
- Проведение обучения персонала.
- Методическая помощь в проведении самооценки предприятия.

2. Организация (предприятие + консалтинговая организация):

- Определение ответственных за разработку и внедрение требований стандарта IRIS.
- Определение процессов предприятия и их характеристики с учетом требований IRIS.
- Формирование матрицы распределения ответственности за процессы IRIS.
- Разработка модели взаимодействия процессов IRIS.
- Определение перечня необходимой документации и записей.
- Разработка плана-графика (линейного) проекта разработки и внедрения СМБ в соответствии с требованиями IRIS.
- Разработка необходимой организационно-распорядительной документации по СМБ IRIS.

3. Проектирование СМБ:

- Приведение Бизнес-плана (стратегии) организации в соответствие требованиями IRIS.
- Разработка карт обязательных процессов в соответствии с требованиями IRIS (не менее 24-х).
- Разработка ключевых показателей деятельности (KPI) при производстве ж/д продукции.
- Приведение в соответствие с требованиями IRIS Политики в области качества.
- Разработка (приведение в соответствие) Политики в области охраны труда в соответствии с IRIS.

4. Разработка системы менеджмента бизнеса:

- Разработка обязательных документированных процедур в соответствии с требованиями IRIS (не менее 16-ти).
- Разработка и оформление документов, содержащих мероприятия по достижению целей бизнеса, мероприятий на случай непредвиденных обстоятельств, мероприятий по устранению узких мест в производстве.
- Разработка формы обязательных записей по качеству (не менее 30-ти).
- Приведение в соответствие с требованиями IRIS Руководства по качеству.

5. Внедрение СМБ:

- Ввод в действие разработанной документации СМБ.
- Подготовка внутренних аудиторов.
- Организация и проведение внутреннего аудита, составление отчетов по результатам внутреннего аудита.
- Определение и осуществление корректирующих и предупреждающих действий по результатам проведенного аудита.
- Обучение руководителей методам измерения и мониторинга процессов.
- Оформление входных данных, проведение анализа внедренной СМБ, оформление выходных данных.

6. Предсертификационная подготовка:

- Тестирование сотрудников предприятия на знание принципов работы в условиях функционирования СМБ.
- Организация и проведение самооценки предприятия в соответствии с методикой Audit-Tool. Оформление результатов самооценки в табличном и графическом виде.
- Проведение предсертификационной проверки внедренной системы менеджмента бизнеса предприятия. Оформление отчета с рекомендациями по устранению выявленных несоответствий.
- Оформление и подача заявки в орган по сертификации.

7. Сертификационный аудит на соответствии IRIS.

Как показывает практика, предприятию достаточен порядок 12 месяцев на подготовку и выход на сертификационный аудит по IRIS.

Заключение

Внедрение стандарта IRIS на отечественных предприятиях, выпускающих элементы рельсовых скреплений, позволит выстроить современную модель ведения бизнеса, направленную на более тесную работу с потребителями продукции железнодорожного назначения. Внедрение в СМК оценки ключевых показателей качества процессов производства позволит более точно (взвешенно) оценивать состояние действующих процессов производства. Процессный подход к таким вопросам, как стоимость жизненного цикла продукции позволит на основе данных от потребителей реально оценивать качество своей продукции и предпринимать действия по его повышению и удовлетворенности потребителей, а наличие сертификата IRIS и размещения данных на общедоступном портале – расширить рынки сбыта продукции.

Список литературы

1. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Гун Г.С., Мезин И.Ю., Рубин Г.Ш., Минаев А.А., Назайбеков А.Е., Дыя Х. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1(45). С. 92–97.
2. Пикалин Ю.А., Скораяева Е.А., Банных Ю.М. Управление качеством на предприятиях-производителях железнодорожной техники путем применения современных технологий менеджмента, заложенных в требованиях международного стандарта железнодорожной промышленности IRIS // Инновационный транспорт. 2015. №4(18). С. 7–12.
3. Yu. Mezin, I. G. Gun, A. S. Limarev, I. A. Mikhailovskiy. Some aspects of launching the production of spring clips for rail fastenings. CIS Iron and Steel Review. 2016. Vol. 12. P. 26–31.
4. Лимарев А.С., Мезин И.Ю., Ушаков М.Ю. Review of the

main requirements for performance and quality characteristics of the railway bolting // Калибровочное бюро. 2016. №8. С. 42–46.

5. Воробьев А.А., Обухова Е.А., Гурьянов С.А. Стандарт IRIS: от традиционной СМК к системе менеджмента бизнеса // Стандарты и качество. 2011. №8. С. 75–77.
6. Юрков А.Ф., Клековкин В.С. Мы первыми в России стали соответствовать требованиям стандарта IRIS // Стандарты и качество. 2013. №2. С. 38–40.
7. Мезин И.Ю., Лимарев А.С., Ушаков М.Ю. Анализ требований к потребительским свойствам рельсовых скреплений и условиям производства пружинных клемм // Качество в обработке материалов. 2016. №2(6). С. 22–27.
8. Лапидус В.А., Котов С.С. Стандарт IRIS – руководство восхождения к деловому совершенству // Техника железных дорог. 2010. №1. С. 38–45.
9. Повышение эффективности производства на основе внедрения инновационной стратегии предприятия / А.С. Лимарев, А.Б. Моллер, Е.Г. Касаткина, С.В. Зотов, М.М. Константинов, И.Н. Глушков // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2015. №4(54). С. 69–72.
10. Моллер А.Б., Лимарев А.С., Каледина О.С. Управление качеством продукции на основе инновационной стратегии предприятия // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. Т. 1. №4(61). С. 45–50.
11. Воробьев А.А., Обухова Е.А. Стандарт IRIS: Переосмысление бизнеса // Техника железных дорог. 2012. №1(17), февраль. С. 69–76.
12. Залунаев М. Создание и внедрение системы менеджмента бизнеса в соответствии с требованиями IRIS // Методы менеджмента качества. 2014. №12. С. 41–42.
13. Кудрявцев С.А. IRIS – современное решение для железнодорожной промышленности // Журнал ММК. 2012. №8.
14. Стандарт IRIS / С.В. Палкин, О.А. Сеньковский и др. // Техника железных дорог. 2009. №1. С. 62–65.
15. Мырзекенова А.Т. Актуальность внедрения и сертификации систем менеджмента на соответствие требованиям международного стандарта IRIS на предприятиях Казахстана // Журнал научных и прикладных исследований. 2015. №5. С. 40–44.
16. The view of Ekaterina Bochkareva on the new Assessment Sheet, compared to the previous questionnaire, 7 Edition IRIS Newsletter. Belgium, June 2015. P. 8.
17. Создание и внедрение системы менеджмента бизнеса в соответствии с требованиями IRIS // Журнал ММК. 2014. №12.
18. IRIS версия 02 – R. Стандарт железнодорожной промышленности. UNIFE 2015.
19. Международный студенческий научный вестник. 2015. №5 (ч. 5). С. 613–614.
20. Колупаев В. IRIS – стандарт для лидеров // Гудок. 29.04.2010.
21. IRIS – стандарт качества // Журнал «Саморегулирование & Бизнес». 2012 август, №8.
22. Озеров К. IRIS как модель роста с инструментами Lean // Стандарты и качество. 2016. №1.
23. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 г.: Постановление Правительства Российской Федерации №877-р от 17.06.2008. М., 2008.

24. Липидус Б. ОАО «РЖД» создает свою корпоративную систему управления качеством // Стандарты и качество. 2007. №11.

25. Шеремет Н. М., Орлов В. Н. Актуальные вопросы управления качеством в ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2007. №4.

Поступила 14.06.17.

Принята в печать 15.08.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-54-61>

MODERN APPROACHES TO RAILWAY PRODUCTS QUALITY MANAGEMENT

Igor Yu. Mezin – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mezinuy1@mail.ru

Igor G. Gun – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mezinuy1@mail.ru

Aleksandr S. Limarev – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aslimarev@mail.ru

Mikhail Yu. Ushakov – Senior Inspector

at the Technical Audit Center of an RZD branch, Magnitogorsk, Russia.

Valery L. Steblyanko – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: v.steblyanko@mail.ru

Sergei A. Fedoseev – D.Sc. (Eng.), Professor

Perm State National Research Polytechnic University, Russia. E-mail: fsa@gelicon.biz

Abstract

At this time, the railway products market is the one that is rapidly growing while offering great investment opportunities. This is due to the fact that in order to satisfy the demand for railway services the market needs novel railway equipment and infrastructure. At the moment, it is ISO 9001 that provides guidelines to ensure the quality of rail fastening systems and other railway products. However, the above standard does not account for all the requirements set by the railway industry today. Based on literature and regulations, the authors of this article attempt to describe the issues of ensuring the quality of railway products with their specific characteristics. The need to elaborate new guidelines for the railway industry is due to the fact that a broad spectrum of complex and controversial issues has to be settled for efficient operation and for rendering services that would meet the expectations of both consumers and railway companies. This laid the basis for the advanced Business Management System (BMS) specified by IRIS. This article examines the possibility to enhance production processes through the implementation of IRIS. Ensuring high quality of products for the railway industry is among the main objectives behind the standard. One of the IRIS features includes a company evaluation process based on points. The article also describes an IRIS-compliant general implementation plan for BMS with regard to the manufacturers of rail fastening systems.

Keywords: Business management system, railway products, product certification, product quality management.

References

1. Gun G.S., Mezin I.Yu., Rubin G.Sh., Minaev A.A., Nazaybekov A.E., Dya H. The genesis of scientific research in the field of steel quality. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1 (45), pp. 92–97.
2. Pikalin Yu.A., Skoraeva E.A., Bannykh Yu.M. *Upravlenie kachestvom na predpriyatiyakh-proizvoditelyakh zheleznodorozhnoy tekhniki putem primeneniya sovremennykh tekhnologiy menedzhmenta, zalozhennykh v trebovaniyakh mezhdunarodnogo standarta zheleznodorozhnoy promyshlennosti IRIS* [Quality management at the enterprises of railway equipment manufacturers implemented through the application of modern management techniques incorporated in the IRIS requirements]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport], 2015, no. 4 (18), pp. 7–12.
3. Yu. Mezin, I. G. Gun, A. S. Limarev, I. A. Mikhailovskiy. Some aspects of launching the production of spring clips for rail fastenings. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, vol. 12, pp. 26–31.
4. Limarev A.S., Mezin I.Yu., Ushakov M.Yu. Review of the main requirements for performance and quality characteristics of the railway bolting. *Kalibrovochnoe byuro* [Pass Design Department], 2016, no. 8, pp. 42–46.
5. Vorobiev A.A., Obukhova E.A., Guryanov S.A. The IRIS standard: From the traditional QMS to the business management system. *Standarty i kachestvo* [Standards and quality], 2011, no. 8, pp. 75–77.
6. Yurkov A.F., Klekovkin V.S. We were the first in Russia to meet the requirements of the IRIS standard. *Standarty i kachestvo* [Standards and quality], 2013, no. 2, pp. 38–40.

7. Mezin I.Yu., Limarev A.S., Ushakov M.Yu. Analysis of the requirements to the properties of rail fastenings and the spring clip production. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Materials processing and quality], 2016, no. 2(6), pp. 22–27.
8. Lapidus V.A., Kotov S.S. The IRIS Standard – A Guide for Reaching Business Excellence. *Tekhnika zheleznykh dorog* [Engineering of railways], 2010, no. 1, pp. 38–45.
9. Limarev A.S., Moller A.B., Kasatkina E.G., Zotov S.V., Konstantinov M.M., Glushkov I.N. Increasing the efficiency of production through the introduction of innovative business strategy. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agramogo universiteta* [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University], 2015, no. 4 (54), pp. 69–72.
10. Moller A.B., Limarev A.S., Kaledina O.S. Quality management on the basis of the company's innovative strategy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the South-West State University], 2015, vol. 1, no. 4 (61), pp. 45–50.
11. Vorobiev A.A., Obukhova E.A. The IRIS standard: Rethinking of business. *Tekhnika zheleznykh dorog* [Engineering of railways], 2012, no. 1(17), February. pp. 69–76.
12. Zalunaev M. Creation and implementation of a business management system in accordance with the IRIS requirements. *Metody menedzhmenta kachestva* [Methods of quality management], 2014, no. 12, pp. 41–42.
13. Kudryavtsev S.A. IRIS as an advanced solution for the railway industry. *Zhurnal MMK* [Journal of MMK], 2012, no. 8.
14. Palkin S.V., Senkovskiy O.A. et al. The IRIS standard. *Tekhnika zheleznykh dorog* [Engineering of railways], 2009, no. 1, pp. 62–65.
15. Myrzenkova A.T. The importance of implementation and certification of management systems for compliance with the IRIS requirements at Kazakhstan enterprises. *Zhurnal nauchnykh i prikladnykh issledovaniy* [Journal of Basic and Applied Research], 2015, no. 5, pp. 40–44.
16. The view of Ekaterina Bochkareva on the new Assessment Sheet, compared to the previous questionnaire, 7 Edition IRIS Newsletter. Belgium, June 2015. 8 p.
17. Creation and implementation of a business management system in accordance with IRIS requirements. *Zhurnal MMK* [Journal of MMK], 2014, no. 12.
18. IRIS version 02 - R. Railway industry standard. UNIFE 2015.
19. *Mezhdunarodnyi studencheskiy nauchnyi vestnik* [International Bulletin of Student Research], 2015, no. 5 (part 5), pp. 613–614.
20. Kolupaev V. IRIS – Standard for Leaders. *Gazeta "Gudok"* [Gudok], 29/04/2010.
21. IRIS – Quality Standard. *Zhurnal "Samoregulirovanie i biznes"* [Self-Control & Business], 2012, no. 8.
22. Ozerov K. IRIS as a Growth Model with Lean Instruments. *Zhurnal "Standarty i kachestvo"* [Journal of Standards and Quality], 2016, no. 1.
23. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v RF do 2030 g.* [Development strategy for the railway industry of the Russian Federation until 2030]. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 877-r dated 17/06/2008.
24. Lapidus B. JSC "RZD" to create its corporate quality management system. *Standarty i kachestvo* [Standards and quality], 2007, no. 11.
25. Sheremet N.M., Orlov V.N. Topical issues of quality management at JSC «Russian Railways». *Zheleznodorozhny transport* [Railway transport], 2007, no. 4.

Received 14/06/17
Accepted 15/08/17

Образец для цитирования

Современные подходы к управлению качеством продукции для железнодорожной отрасли / Мезин И.Ю., Гун И.Г., Лимарев А.С., Ушаков М.Ю., Стебляно В.Л., Федосеев С.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 54–61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-54-61>

For citation

Mezin I.Yu., Gun I.G., Limarev A.S., Ushakov M.Yu., Steblyanko V.L., Fedoseev S.A. Modern approaches to quality management for railway industry. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 54–61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-54-61>

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 662.74.012:658.562

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-62-67>СОПОСТАВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА КОКСА M_{25} И M_{10}

Смирнов А.Н., Алексеев Д.И.

Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в статье рассмотрены современные математические модели структурного типа [1] для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} , которые используются для теоретических исследований и в практической деятельности коксохимических предприятий России. Для рассматриваемых моделей приведены к единому виду их точности прогнозирования и произведено сопоставление с требованием ГОСТ 5953-93 «Кокс с размером кусков 20 мм и более. Определение механической прочности» (ИСО 556-80). **Цель работы:** сопоставление и анализ адекватности математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} , исходя из точности их прогнозирования. **Используемые методы:** проведена статистическая оценка доверительных интервалов попадания ошибки прогнозирования математических моделей для показателей качества кокса M_{25} и M_{10} . На основе длины доверительного интервала при различных доверительных вероятностях делались выводы относительно точности прогнозирования. **Новизна:** возможность верификации математических моделей при прогнозировании показателей качества кокса M_{25} и M_{10} , основываясь на том, что точность прогнозирования по модели не должна превосходить допустимое расхождение между двумя параллелями при определении показателей качества кокса по ГОСТ 5953. **Результат:** в статье приведено сравнение точностей прогнозирования различных математических моделей структурного типа, которое позволило проанализировать адекватность математических моделей. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы для теоретических исследований и в практической деятельности коксохимических предприятий России.

Ключевые слова: кокс, показатели качества кокса, математическая модель, классификация по внутренней структуре и алгоритму построения, структурная модель.

Введение

В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных моделированию и прогнозированию показателей качества кокса для различных коксохимических предприятий России [1]. Тем не менее достаточно сложно выбрать ту или иную модель для моделирования и исследования, поскольку даже по такому параметру, как их точность прогнозирования отсутствуют единый критерий оценки. Это объясняется тем, что на практике авторы большинства работ мало уделяют внимания проверке математических моделей с точки зрения их точности прогнозирования. В данной статье проанализированы самые распространённые структурные математические модели [2–13] и выполнена оценка точности их прогноза. Точности прогнозирования рассмотренных моделей приведены к единому виду и сопоставлены с требованием ГОСТ 5953-93 «Кокс с раз-

мером кусков 20 мм и более. Определение механической прочности» (ИСО 556-80).

Методы исследования точности прогнозирования математических моделей

В качестве оценки точности прогноза модели мы использовали доверительный интервал ε_α ¹ единичного результата нахождения ошибки прогнозирования Δ , который вычисляется как разность между фактическим значением показателя качества кокса и его прогнозом по уравнению модели. Методика расчёта доверительных интервалов приводится, например, в [14].

Определимся со значением доверительной вероятности α . Из-за возможных сбоях в работе КХП поддерживается не 100% равномерность, это идеальный случай, а, например, 95%. С 95% доверительной вероятностью оценивается точность прогнозирования в моделях [6–9]. С другой стороны, если при статистической оценке речь идёт о жизни

© Смирнов А.Н., Алексеев Д.И., 2017

¹ α – это доверительная вероятность P .

и здоровье человека или больших материальных ценностях, то корректно задаваться не 95% доверительной вероятностью, а исходить из 99% доверительной вероятности. Само по себе производство кокса в сравнении с другим сырьём, используемым в доменной плавке, является дорогостоящим, и это без учёта масштабов использования кокса в доменном процессе, поэтому при оценке точности математической модели, логично исходить из 99% доверительной вероятности. В данной работе, с учётом вышесказанного, расчёт интервалов попадания ошибки прогнозирования Δ выполнен с доверительными вероятностями P , равными 95 и 99%.

Результаты исследования и их обсуждение

В работе [15] приводятся данные о точности прогнозирования моделей, рассмотренных в ранних работах [2, 4], которые показали низкую прогнозирующую способность этих моделей. В одной из последних моделей [6], являющейся правопреемницей [2–5], была достигнута высокая точность прогнозирования. В статье [6] приводится по два уравнения для расчёта показателей M_{40} и M_{10} , исходя из учёта технологии подготовки шихт пневмомеханической сепарацией или без неё. После проверочного расчёта для 110 шихт, коксовавшихся на 2-м блоке ОАО НТМК в 2000–2004 гг., было определено, что среднеквадратичное отклонение для ошибки прогноза показателей M_{40} и M_{10} составило для одной из пар уравнений 1,01 и 0,35%, а для второй пары уравнений 0,89 и 0,34% соответственно. Большая точность прогнозирования была достигнута для второй пары уравнений, которая при доверительной вероятности 95% «...соответствует точности прогноза показателя прочности по M_{40} на уровне 1,78 и по M_{10} 0,68%» [6].

Величину возможного отклонения $\varepsilon_{0,95}$ и $\varepsilon_{0,99}$ при доверительных вероятностях 95 и 99% для лучшей пары уравнений² [15] рассчитали, исходя из того, что ошибка прогнозирования Δ в работе [6] распределена по нормальному закону и её среднее значение $\bar{\Delta}$ при большом числе прогнозирования стремится к нулю³:

для M_{40} :

$$\varepsilon_{0,95} = t(P; f) \cdot S(\Delta) = t(0,95; 109) \cdot S(\Delta) = 1,982 \cdot 0,89 = 1,76\%, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{0,99} = t(P; f) \cdot S(\Delta) = t(0,99; 109) \cdot S(\Delta) = 2,622 \cdot 0,89 = 2,33\%; \quad (2)$$

для M_{10} :

$$\varepsilon_{0,95} = t(0,95; 109) \cdot S(\Delta) = 1,982 \cdot 0,34 = 0,67\%, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{0,99} = t(0,99; 109) \cdot S(\Delta) = 2,622 \cdot 0,34 = 0,89\%. \quad (4)$$

Рассчитанные доверительные интервалы в (1)–(4) для M_{40} и M_{10} означают, что при использовании математической модели, при её единичном прогнозе, ошибка прогнозирования будет находиться в соответствующем интервале, например, при единичном прогнозе по модели для M_{40} ошибка прогнозирования Δ с вероятностью 99% будет находиться в интервале $\pm 2,33\%$. В [9] для подтверждения адекватности вновь построенной модели предлагается сравнивать длину доверительного интервала со значением расхождения двух параллельных определений параметров M_{25} или M_{10} по ГОСТ 5953. Если длина доверительного интервала меньше разницы параметров M_{25} или M_{10} в параллельных пробах, то модель следует признать адекватной и работоспособной. Максимальное расхождение для параметра M_{40} и M_{10} при определении в двух параллелях составляет 3,0 и 1,0% соответственно. Таким образом, модель [6] с учётом рассчитанных по формулам (2) и (4) интервалов с доверительной вероятностью 99% имеет высокую отказоустойчивость и пригодна для использования в экономических расчётах.

Полученные результаты (1)–(4) для модели [6], и по сути аналогичной [7–9], сопоставимы с прогнозирующей способностью другой модели структурного типа [10–13], проверим её адекватность, исходя из ГОСТ 5953.

В работах [10–13], по нашему мнению, можно выделить два подхода к прогнозированию. В одном случае используются индексы отношения $K_{от}$ и коксуемости K , а в другом – микропрочность испытуемого угля B . Индексы $K_{от}$ и K , которые используются в первом подходе к моделированию, не будем подробно рассматривать, так как их физический смысл, достоинства и недостатки, по нашему мнению, аналогичны соответствующим коэффициентам из моделей [2–9], хотя хронологически они появились ранее в [10].

Микропрочность испытуемого угля B , используемая во втором подходе, определяется по формуле [13]

$$B = 100 / M_{10}. \quad (5)$$

Суммарную микропрочность в шихте предлагается учитывать как сумму взаимодействий каждого отдельного угля между одноименными и разноимёнными марками. Для n -компонентной шихты выражение для B будет иметь вид [13]

² По всей видимости, авторы работы [6], ввиду большого объёма выборки, при аналогичных расчётах воспользовались правилом «2-х сигм», что в данном случае, оправданно.

³ Прогноз по модели может быть как больше, так и меньше истинного значения, то есть ошибка Δ принимает как положительные, так и отрицательные значения.

$$B = \sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot B_{ii} + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_i \cdot a_j \cdot B_{ij}, \quad (6)$$

где a_i, a_j – массовая доля угля в смеси; B_{ii} – прочность спекания фрагментов кокса из индивидуальных углей; B_{ij} – прочность спекания фрагментов кокса из i -й и j -й марки углей.

Суммарная массовая доля всех углей в n -компонентной шихте составит

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (7)$$

В отличие от моделей [2–9], в которых все стороны характеризовались начальное состояние (характеристика углей), а затем конечное, без описания происходящего процесса, в уравнениях (5)–(7) закладывается именно процесс коксования, взаимодействия углей между собой (B_{ij}). Упрощение в такой модели состоит в том, что учитываются только взаимодействия между двумя сортами углей, а не тремя, четырьмя, ..., n сортами в n компонентной шихте.

Для оценки прогнозирующей способности модели, основанной на коэффициентах $K_{от}$ и K , воспользуемся данными, приведенными в работе [12]:

$$M_{25} = 36,60 + 0,1602 \cdot G; \quad (8)$$

$$N = 31; S(\Delta) = 1,2;$$

$$M_{10} = 58,58 - 0,1523 \cdot G; \quad (9)$$

$$N = 41; S(\Delta) = 1,6,$$

где G – остаток в большом колосниковом барабане, рассчитываемый с помощью $K_{от}$ и K , кг; $S(\Delta)$ – оценка среднеквадратического отклонения ошибки прогнозирования; N – количество раз сопоставления результатов коксования и прогнозирования.

Для модели [12] найдём доверительную ошибку для результата единичного измерения Δ при вероятностях 95 и 99%⁴:

для M_{25} :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0,95} &= t(P; f) \cdot S(\Delta) = t(0,95; 30) \cdot S(\Delta) = \\ &= 2,04 \cdot 1,2 = 2,45\%; \quad \varepsilon_{0,99} = 3,30\%; \end{aligned} \quad (10)$$

для M_{10} :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0,95} &= t(P; f) \cdot S(\Delta) = t(0,95; 40) \cdot S(\Delta) = \\ &= 2,02 \cdot 1,6 = 3,23\%; \quad \varepsilon_{0,99} = 4,32\%. \end{aligned} \quad (11)$$

⁴ При расчётах полагали, что модель [12] не имеет систематической ошибки, то есть она в среднем не занижает и не завышает прогнозируемое значение, математическое ожидание ошибки прогнозирования Δ в пределе от количества прогнозирований стремится к нулю, и она имеет нормальное (гауссово) распределение.

По ГОСТ 5953 при трёх параллельных испытаниях расхождения между параллелями для M_{25} могут составлять 3,6%; возможное количество определений в параллелях – четыре, при этом максимальное расхождение для параметра M_{10} составляет 1,6%. Сравнивая значения (10) и (11) с 3,6 и 1,6% соответственно, можно отметить, что прогнозирование параметра M_{25} по модели [12] не противоречит ГОСТ 5953, тогда как прогноз по показателю M_{10} не является адекватным.

Нами была проанализирована прогнозирующая способность модели [12] при моделировании качества кокса из углей, которые не входили в сырьевую базу, на основе которой она была построена, по данным из [13].

Найдём интервал попадания ошибки прогнозирования при различных значениях доверительной вероятности. Оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения, рассчитанные по данным работы [13], соответствуют:

$$N = 10; \tilde{m}_{M_{25}} = -0,58; S(\Delta_{M_{25}}) = 1,49; \quad (12)$$

$$N = 10; \tilde{m}_{M_{10}} = 0,54; S(\Delta_{M_{10}}) = 1,14. \quad (13)$$

Найдём доверительные интервалы для средних значений $\tilde{m}_{M_{25}}$ и $\tilde{m}_{M_{10}}$:

$$\varepsilon(\tilde{m}_{M_{25}}) = \frac{t(0,95; 9) \cdot S(\Delta_{M_{25}})}{\sqrt{N}} = \frac{2,26 \cdot 1,49}{\sqrt{10}} = 1,06;$$

$$\varepsilon(\tilde{m}_{M_{10}}) = \frac{t(0,95; 9) \cdot S(\Delta_{M_{10}})}{\sqrt{N}} = \frac{2,26 \cdot 1,14}{\sqrt{10}} = 0,81.$$

Так как

$$\varepsilon(\tilde{m}_{M_{25}}) = 1,06 > |-0,58| = |\tilde{m}_{M_{25}}|$$

$$\varepsilon(\tilde{m}_{M_{10}}) = 0,81 > |0,54| = |\tilde{m}_{M_{10}}|,$$

то $\tilde{m}_{M_{25}}$ и $\tilde{m}_{M_{10}}$ значимо от нуля не отличаются, их можно принять равными нулю. Тогда доверительный интервал для ошибки прогнозирования Δ модели [12] по данным [13] составит:

для M_{25} :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0,95} &= t(P; f) \cdot S(\Delta) = t(0,95; 9) \cdot S(\Delta_{M_{25}}) = \\ &= 2,26 \cdot 1,49 = 3,37; \quad \varepsilon_{0,99} = 4,84, \end{aligned} \quad (14)$$

для M_{10} :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0,95} &= t(P; f) \cdot S(\Delta) = t(0,95; 9) \cdot S(\Delta_{M_{10}}) = \\ &= 2,26 \cdot 1,14 = 2,58; \quad \varepsilon_{0,99} = 3,71, \end{aligned} \quad (15)$$

Из формул (14) и (15) следует, что параметр M_{25} при доверительной вероятности 95% может использоваться для «прикидочной» оценки каче-

ства кокса из углей, не входивших в сырьевую базу, на которой она была построена. Параметр M_{10} для прогнозирования качества кокса и в случае «незнакомых» для модели углей использовать нельзя, что является закономерным, с учётом выводов, сделанных относительно [12].

Произведём дополнительную оценку прогнозирующей способности модели [13] тем же методом, что и в работе [15], результаты которой представим в **таблице**.

Процент попадания значений параметров M_{25} , M_{10}

Величина интервала ошибки, %	Процент попадания значений параметров M_{25} , M_{10} в заданный интервал при моделировании качества кокса из углей, которые не входили в сырьевую базу, на основе которой была построена модель, %	
	M_{25}	M_{10}
$\pm 0,5$	30	20
$\pm 0,7$	40	30
$\pm 1,0$	70	90
$\pm 1,5$	80	90
$\pm 2,0$	80	90
$\pm 3,0$	90	90
$\pm 4,0$	100	100

Примечание. Количество прогнозируемых значений – 10.

Из **таблицы** видно, что фактически, с учётом ГОСТ 5953, все прогнозные значения по параметру M_{25} и M_{10} , кроме одного прогноза для M_{10} , можно было принять за «прикидочные» для оценки качества кокса из углей нового месторождения. Таким образом, получение «прикидочного» прогноза для M_{10} возможно при меньшей чем 95% доверительной вероятности, при условии, что прогнозирование будет осуществляться для значительного количества шихт, составленных из марок нового месторождения.

Заключение

Модель, рассмотренная в работах [11–13], адекватна для оценочного прогнозирования показателя качества кокса M_{25} на углях, входивших в её базу коксования.

Показано, что модель [11–13] имеет низкую прогнозирующую способность по сравнению с моделью [6–9], но может быть использована для «прикидочного» прогнозирования показателей качества кокса на «незнакомых» углях.

Наиболее продумана и закончена с точки зрения практического применения, по нашему мнению, модель, рассмотренная в работах [6–9].

Список литературы

1. Смирнов А.Н., Петухов В.Н., Алексеев Д.И. Анализ принципов построения математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} с целью классификации и разработки концепции «гибридной модели» // Кокс и химия. 2015. № 5. С. 13–18.
2. Взаимосвязь между механической прочностью кокса, химико-петрографическими параметрами шихт из кузнецких углей и режимом их коксования / Станкевич А.С., Золотухин Ю.А., Калинина Г.И. и др. // Кокс и химия. 1981. № 2. С. 27–31.
3. Станкевич А.С., Мюллер И.П., Лельчук В.И. Распределение углей и составление угольных шихт для коксования с прогнозом качества кокса на основе линейного программирования // Кокс и химия. 1981. № 11. С. 4–8.
4. Станкевич А.С. Расчёт шихт и прогноз качества кокса из углей восточных бассейнов на основе их терографических параметров // Кокс и химия. 1983. № 9. С. 11–16.
5. Прогноз качества кокса на основе параметров Единой промышленно-генетической классификации углей / Станкевич А.С., Трегуб В.В., Алешин В.И. и др. // Кокс и химия. 1990. № 12. С. 36–39.
6. Прогноз прочности кокса на основе химико-петрографических параметров угольных шихт с учётом их пневмомеханической сепарации / Станкевич А.С., Степанов Ю.В., Гилязетдинов Р.Р. и др. // Кокс и химия. 2005. № 12. С. 14–21.
7. Станкевич А.С., Станкевич В.С. Определение технологической ценности углей, используемых для производства кокса // Кокс и химия. 2011. №6. С. 2–10.
8. Станкевич А.С., Станкевич В.С. Методика определения коксующести и технологической ценности углей пластов и их смесей // Кокс и химия. 2012. №1. С. 4–12.
9. Станкевич А.С., Базегский А.Е. Оптимизация качества кокса ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» с учётом особенностей угольной сырьевой базы // Кокс и химия. 2013. №10. С. 14–21.
10. Расчёт шихт для коксования на основе петрографических особенностей углей / Аммосов И.И., Ерёмин И.В., Сухенко С.И. и др. // Кокс и химия. 1957. №12. С. 9–12.
11. Ерёмин И.В., Гагарин С.Г. Расчёт шихт для коксования на основе петрографической модели // Кокс и химия. 1992. №12. С. 9–15.
12. Гагарин С.Г., Ерёмин И.В. Компьютерный мониторинг прочности кокса на основе петрографической модели расчёта угольных шихт // Кокс и химия. 1995. № 2. С. 10–15.
13. Гагарин С.Г. Оценка петрографической модели прогноза прочности кокса на примере углей Монголии // Кокс и химия. 2011. №4. С. 21–26.
14. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для студентов вузов. 10-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 576 с.
15. Метод прогноза прочности кокса и расчёта состава угольных шихт. 1. Проверка и критическая оценка предложенных методов прогноза / Киселёв Б.П., Стуков М.И. Ольшанецкий Л.Г. и др. // Кокс и химия. 1990. № 3. С. 34–37.

Поступила 15.03.17.

Принята в печать 07.06.17.

COMPARISON AND ADEQUACY ANALYSIS OF THE MATHEMATICAL MODELS FOR PREDICTING THE M_{25} AND M_{10} COKE QUALITY INDICES

Andrey N. Smirnov – D.Sc. (Physics and Mathematics)

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sman@magtu.ru

Danil I. Alekseev – Teaching Assistant

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: alekseev41047@mail.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): This article examines contemporary structural models [1] designed for predicting the M_{25} and M_{10} coke quality indices, which are used for theoretical research and in practical application by Russia's coke producers. For the studied models, the model accuracy indicators were brought to a single format and the features were compared with the specification given in GOST 5953-93 "+20 mm coke. Physical strength determination" (ISO 556-80). **Objectives:** The objectives include a comparison and an adequacy analysis of the mathematical models designed for predicting the M_{25} and M_{10} coke quality indices based on the models' predictive accuracy. **Methods Applied:** The authors carried out a statistical analysis of the confidence intervals for the prediction error of mathematical models designed for predicting the M_{25} and M_{10} coke quality indices. The authors looked at the length of the confidence interval at various confidence probabilities before drawing conclusions on the models' predictive accuracy. **Originality:** This work provides an opportunity to verify the mathematical models for predicting the M_{25} and M_{10} coke quality indices based on the fact that the predictive accuracy of the model should not exceed the allowable discrepancy between two parallels when analyzing the coke quality per GOST 5953. **Findings:** The article provides a comparison between different structural models in terms of their predictive accuracy. This comparison helped analyze the adequacy of the mathematical models. **Practical Relevance:** The results obtained can be used for theoretical research and in practical application by Russia's coke producers.

Keywords: Coke, coke quality indices, mathematical model, classification on the basis of internal structure and algorithm, structural model.

References

- Smirnov A.N., Petukhov V.N., Alekseev D.I. Looking at how mathematical models are built for predicting the M_{25} and M_{10} coke quality indices for the purposes of classification and developing the concept of a hybrid model. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 2015, no. 5, pp. 13–18. (In Russ.)
- Stankevich A.S., Zolotukhin Yu.A., Kalinina G.I., Aleshin V.I., Chemerko V.A. A relationship between the physical strength of coke, the chemical and petrographic composition of burden material made with the Kuzbass coal and the coking process. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1981, no. 2, pp. 27–31. (In Russ.)
- Stankevich A.S., Myuller I.P., Le'l'chuk V.I. Coal blending for coking and linear programming for predicting the coal quality. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1981, no. 11, pp. 4–8. (In Russ.)
- Stankevich A.S. Charge calculation and predicting the quality of coke made with coal from the Asian basins based on its terographic characteristics. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1983, no. 9, pp. 11–16. (In Russ.)
- Stankevich A.S., Tregub V.V., Aleshin V.I., Fisich M.V., Gribovich A.V., Tsinker L.Z. Predicting the coke quality based on the Unified Industrial Coal Classification. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1990, no. 12, pp. 36–39. (In Russ.)
- Stankevich A.S., Stepanov Yu.V., Gilyazetdinov R.R., Popova N.K. Predicting the physical strength of coke on the basis of the chemical and petrographic composition of coal burden material. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 2005, no. 12, pp. 14–21. (In Russ.)
- Stankevich A.S., Stankevich V.S. Determining the value of coals used for coke production. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 2011, no. 6, pp. 2–10. (In Russ.)
- Stankevich A.S., Stankevich V.S. Methods for determining the coking properties and the value of coal and coal mixtures. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 2012, no. 1, pp. 4–12. (In Russ.)
- Stankevich A.S., Bazegskiy A.E. Optimizing the quality of the EVRAZ ZSMK coke with regard to the properties of the available coal. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 2013, no. 10, pp. 14–21. (In Russ.)
- Ammosov I.I., Eremin I.V., Sukhenko S.I., Oshurkova L.S. Calculation of coking charges based on the petrographic properties of coals. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1957, no. 12, pp. 9–12. (In Russ.)
- Eremin I.V., Gagarin S.G. Calculation of coking charges on the basis of a petrographic model. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1992, no. 12, pp. 9–15. (In Russ.)
- Gagarin S.G., Eremin I.V. Computer monitoring of coke strength on the basis of a petrographic coal charge calculation model. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1995,

- no. 2, pp. 10–15. (In Russ.)
13. Gagarin S.G. Coke strength petrographic prediction model assessment – A case study of Mongolian coals. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 2011, no. 4, pp. 21–26. (In Russ.)
14. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. 10th edition. Moscow: Akademiya Publishing Centre, 2005, 576 p. (In Russ.)
15. Kiselev B.P., Stukov M.I., Olshanetskiy L.G., Leushin B.A., Tyagunov L.I. A method for predicting the coke strength and calculating the coal charge mixtures. 1. Verification and assessment of the prediction methods proposed. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1990, no. 3, pp. 34–37. (In Russ.)

Received 15/03/17

Accepted 07/06/17

Образец для цитирования

Смирнов А.Н., Алексеев Д.И. Сопоставление и анализ адекватности математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 62–67. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-62-67>

For citation

Smirnov A.N., Alekseev D.I. Comparison and adequacy analysis of the mathematical models for predicting the M_{25} and M_{10} coke quality indices. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 62–67. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-62-67>

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.874:531.314.5

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-68-73>

ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ МОСТОВОГО КРАНА УРАВНЕНИЯМИ ЛАГРАНЖА II РОДА

Енин С.С., Омельченко Е.Я., Белый А.В., Фомин Н.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в статье выполнен анализ движения 3-массовой системы механизмов мостовых кранов. Актуальность работы заключается в использовании уравнений Лагранжа II рода для описания движения системы. Данный подход позволяет исследовать динамические свойства крановых механизмов, так как именно динамические нагрузки являются в большей степени причиной выхода из строя оборудования кранов. **Цель работы:** получение уравнений движения механизмов мостового крана для использования их при построении математических и компьютерных моделей крановых электроприводов. **Используемые методы:** применялся метод анализа объекта (мостового крана) путем синтеза его отдельных механизмов в единую 3-массовую систему для получения зависимостей скоростей и ускорений от других физических и технологических параметров. **Новизна:** система механизмов мостового крана рассматривается не отдельными элементами, а как взаимосвязанная система, в которой работа одного объекта оказывает влияние на работу других объектов системы. Используются уравнения Лагранжа II рода для описания движения системы без каких-либо упрощений, что указывает на более точное описание процессов работы крана. **Результат:** в статье определены обобщенные координаты механизмов подъема, перемещения грузовой тележки и моста. Определена кинетическая энергия механической системы и найдены обобщенные силы, действующие на каждый механизм. Составлены уравнения Лагранжа II рода по каждой обобщенной координате. Выведены уравнения движения каждого элемента системы, отражающие взаимные связи между ними. **Практическая значимость:** указаны возможности применения данных уравнения в дальнейших исследованиях систем мостовых кранов. На основе полученных уравнений можно строить точные математические и компьютерные модели для изучения движения механизмов мостовых кранов.

Ключевые слова: мостовой кран, уравнение Лагранжа II рода, обобщенная координата, кинетическая энергия системы, обобщенная сила, уравнение движения системы.

Введение

Одним из наиболее распространенных средств механизации погрузочно-разгрузочных работ в металлургическом производстве, на строительных площадках, в речных и морских портах, на железнодорожном транспорте являются грузоподъемные краны, обеспечивающие подъем груза, перемещение его на определенное расстояние и опускание с помощью грузозахватного устройства [1].

Анализ динамики крановых механизмов, как правило, сводится к анализу отдельных элементов с множеством упрощений. Например, в работе [2] при рассмотрении системы подъема груза не рассматривается влияние движения груза при его отклонениях от вертикальной оси на

формирование нагрузки для системы привода механизма. В работе [3] приведена методика расчета параметров двигателя механизма подъема мостового крана, однако не учтены возможные колебания груза от движения грузовой тележки и моста, приводящие к дополнительным колебаниям момента двигателя.

Получение уравнений движения механизмов мостового крана через алгоритм использования уравнений Лагранжа позволяет в полной мере выявить закономерности и зависимости между переменными во всех режимах работы крана.

Уравнение Лагранжа второго рода имеет следующий вид [4]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i,$$

где T – кинетическая энергия механической си-

стемы; Q_i – обобщенная сила, соответствующая i -й координате (может быть выражена как потенциальная энергия механической системы); q_i – обобщенная координата; \dot{q}_i – обобщенная скорость; $i=1, 2, \dots, k$ (механическая система имеет k обобщенных координат).

Определение кинетической энергии системы мостового крана

Если рассматривать механическую систему мостового крана (см. **рисунок**), то данная система имеет 5 степеней свободы, соответственно, чтобы описать систему уравнениями Лагранжа, необходимо иметь 5 обобщенных координат q_i и

- соответствующих им обобщенных скоростей \dot{q}_i :
- $q_1 = y_1$ – координата перемещения груза по вертикали (длина подвеса);
 - $q_2 = x_2$ – координата перемещения грузовой тележки;
 - $q_3 = x_3$ – координата перемещения моста;
 - $q_4 = \alpha$ – координата углового перемещения груза по направлению движения тележки;
 - $q_5 = \beta$ – координата углового перемещения груза по направлению движения моста.

Кинетическая энергия системы выражается в абсолютном движении через обобщенные координаты и обобщенные скорости. Для каждого механизма мостового крана кинетическая энергия определяется выражениями:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{m_1 V_1^2}{2} = \frac{m_1 \dot{y}_1^2}{2} \\ T_2 = \frac{m_2 V_2^2}{2} = \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2} \\ T_3 = \frac{m_3 V_3^2}{2} = \frac{m_3 \dot{x}_3^2}{2} \\ T_4 = \frac{m_1 V_4^2}{2} = \frac{m_1 (\dot{x}_4^2 + \dot{y}_4^2)}{2} \\ T_5 = \frac{m_1 V_5^2}{2} = \frac{m_1 (\dot{x}_5^2 + \dot{y}_5^2)}{2} \end{cases} \quad (1)$$

Перемещения груза по осям x и y выражаются через обобщенные координаты:

$$x_4 = x_2 - y_1 \sin \alpha; \quad y_4 = y_1 \cos \alpha;$$

$$x_5 = x_3 - y_1 \sin \beta; \quad y_5 = y_1 \cos \beta.$$

Если полученные уравнения подставить в систему (1), уравнения принимают вид

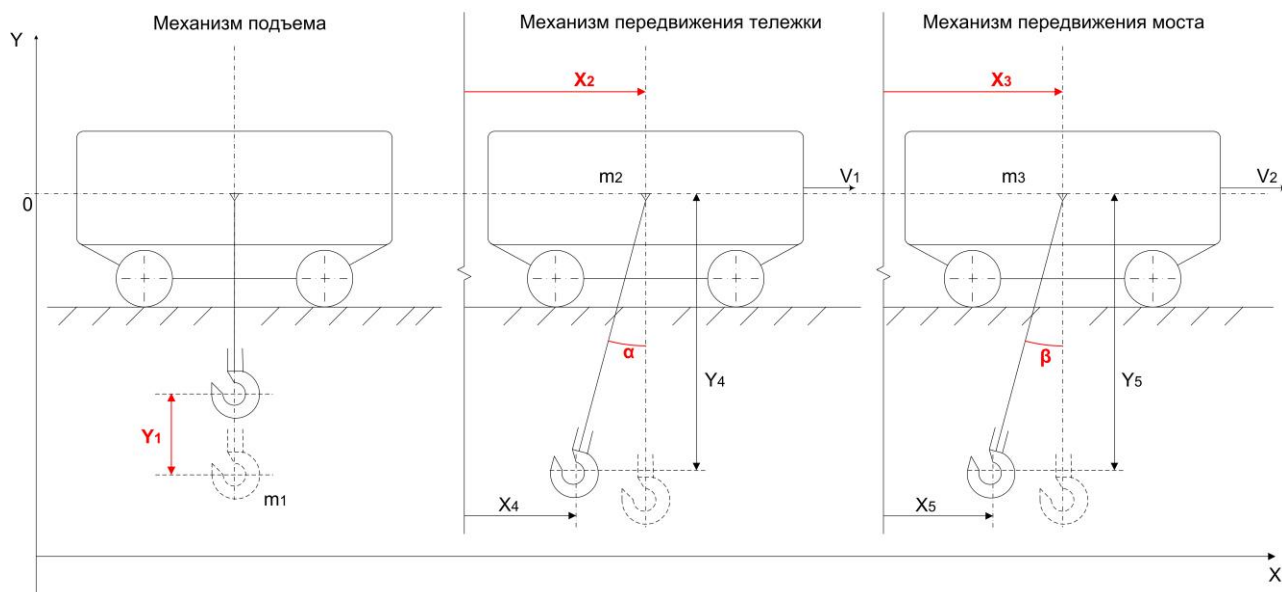
$$\begin{cases} T_1 = \frac{m_1 \dot{y}_1^2}{2} \\ T_2 = \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2} \\ T_3 = \frac{m_3 \dot{x}_3^2}{2} \\ T_4 = \frac{m_1 \left((x_2 - \dot{y}_1 \sin \alpha)^2 + (y_1 \cos \alpha)^2 \right)}{2} \\ T_5 = \frac{m_1 \left((x_3 - \dot{y}_1 \sin \beta)^2 + (y_1 \cos \beta)^2 \right)}{2} \end{cases}$$

После ряда преобразований запишем выражения для определения кинетической энергии элементов системы

$$\begin{cases} T_1 = \frac{m_1 \dot{y}_1^2}{2} \\ T_2 = \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2} \\ T_3 = \frac{m_3 \dot{x}_3^2}{2} \\ T_4 = 1/2 m_1 \left((\dot{x}_2 - \dot{y}_1 \sin \alpha - y_1 \dot{\alpha} \cos \alpha)^2 + (\dot{y}_1 \cos \alpha - y_1 \dot{\alpha} \sin \alpha)^2 \right) \\ T_5 = 1/2 m_1 \left((\dot{x}_3 - \dot{y}_1 \sin \beta - y_1 \dot{\beta} \cos \beta)^2 + (\dot{y}_1 \cos \beta - y_1 \dot{\beta} \sin \beta)^2 \right) \end{cases}$$

После определения энергии элементов системы можно найти кинетическую энергию всей системы

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^5 T_i; \\ T &= 1/2 \left[m_1 \dot{y}_1^2 + m_2 \dot{x}_2^2 + m_3 \dot{x}_3^2 + \right. \\ &+ m_1 \left((\dot{x}_2 - \dot{y}_1 \sin \alpha - y_1 \dot{\alpha} \cos \alpha)^2 + \right. \\ &+ \left. (\dot{y}_1 \cos \alpha - y_1 \dot{\alpha} \sin \alpha)^2 \right) + \\ &+ \left. \left((\dot{x}_3 - \dot{y}_1 \sin \beta - y_1 \dot{\beta} \cos \beta)^2 + \right. \right. \\ &+ \left. \left. (\dot{y}_1 \cos \beta - y_1 \dot{\beta} \sin \beta)^2 \right) \right] \end{aligned}$$



Кинематическая схема механизмов мостового крана (с выделенными обобщенными координатами)

Определение обобщенных сил системы мостового крана

Для определения обобщенных сил надо сообщить системе такое возможное перемещение, при котором изменяется только координата q_i , получая положительное приращение δq_i , вычислить на этом перемещении сумму элементарных работ всех действующих сил и подставить полученное выражение в выражение $\delta A_i = Q_i \delta q_i$, при этом коэффициент при δq_i и дает искомую величину обобщенной силы [5].

Определение обобщенных сил, соответствующих выбранным координатам:

$$\begin{cases} Q_1 = -F_1 + m_1 g \\ Q_2 = F \\ Q_3 = F_3 \\ Q_4 = -m_1 g y_1 \cos \alpha \\ Q_5 = -m_1 g y_1 \cos \beta \end{cases}$$

В данной систем уравнений силы F_1, F_2, F_3 являются внешними силами, которые прикладываются к механизмам подъема, перемещения тележки и моста соответственно. В частности, данные силы возникают в системах электроприводов механизмов.

Составление системы уравнений Лагранжа II рода

Система уравнений Лагранжа по каждой обобщенной координате имеет вид

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_1} = Q_1 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_2} = Q_2 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_3} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_3} = Q_3 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_4} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_4} = Q_4 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_5} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_5} = Q_5 \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial y_1} = F_1 - m_1 g \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_2} = F_2 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_3} = F_3 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = -m_1 g y_1 \sin \alpha \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \beta} = -m_1 g y_1 \sin \beta \end{cases}$$

Если подставить все значения в уравнения Лагранжа и продифференцировать левые части, получится система дифференциальных уравнений движения механизмов мостового крана

$$\left\{ \begin{array}{l} 1) m_1 \ddot{y}_1 - m_1 \ddot{x}_2 \sin \alpha - m_1 \ddot{x}_3 \sin \beta - \\ \quad - m_1 (\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) y_1 = -F_1 + m_1 g \\ 2) (m_1 + m_2) \ddot{x}_2 - m_1 \ddot{y}_1 \sin \alpha - 2m_1 \dot{\alpha} \dot{y}_1 \cos \alpha + \\ \quad + m_1 (\dot{\alpha}^2 \sin \alpha - \ddot{\alpha} \cos \alpha) y_1 = F_2 \\ 3) (m_1 + m_3) \ddot{x}_3 - m_1 \ddot{y}_1 \sin \beta - 2m_1 \dot{\beta} \dot{y}_1 \cos \beta + \\ \quad + m_1 (\dot{\beta}^2 \sin \beta - \ddot{\beta} \cos \beta) y_1 = F_3 \\ 4) m_1 y_1^2 \ddot{\alpha} - 2m_1 y_1 \dot{y}_1 \dot{\alpha} + m_1 y_1 \ddot{x}_2 \cos \alpha = \\ \quad = -m_1 g y_1 \sin \alpha \\ 5) m_1 y_1^2 \ddot{\beta} - 2m_1 y_1 \dot{y}_1 \dot{\beta} + m_1 y_1 \ddot{x}_3 \cos \beta = \\ \quad = -m_1 g y_1 \sin \beta \end{array} \right.$$

Выразив данную систему уравнений в форме Коши, получаются уравнения движения обобщенных координат для движения каждого механизма (2).

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{y}_1 = \frac{-F_1 + m_1 g + m_1 \ddot{x}_2 \sin \alpha + m_1 \ddot{x}_3 \sin \beta + m_1 y_1 (\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2)}{m_1} \\ \ddot{x}_2 = \frac{F_2 + m_1 \ddot{y}_1 \sin \alpha + 2m_1 \dot{\alpha} \dot{y}_1 \cos \alpha + m_1 y_1 (\ddot{\alpha} \cos \alpha - \dot{\alpha}^2 \sin \alpha)}{m_1 + m_2} \\ \ddot{x}_3 = \frac{F_3 + m_1 \ddot{y}_1 \sin \beta + 2m_1 \dot{\beta} \dot{y}_1 \cos \beta + m_1 y_1 (\ddot{\beta} \cos \beta - \dot{\beta}^2 \sin \beta)}{m_1 + m_2 + m_3} \\ \ddot{\alpha} = \frac{-\ddot{x}_2 \cos \alpha + 2 \dot{y}_1 \dot{\alpha} - g \sin \alpha}{y_1} \\ \ddot{\beta} = \frac{-\ddot{x}_3 \cos \beta + 2 \dot{y}_1 \dot{\beta} - g \sin \beta}{y_1} \end{array} \right. \quad (2)$$

Последняя система уравнений представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно обобщенных координат [6].

Заключение

Полученные дифференциальные уравнения позволяют строить математические модели механизмов крана с учетом взаимного влияния узлов объекта. С учетом достижений современной вычислительной техники и программного обеспечения [7, 8] нет необходимости упрощения дифференциальных уравнений движения механизмов, в результате чего можно получить адекватную компьютерную модель, которая с достаточной точностью будет воспроизводить реаль-

ные процессы, протекающие при работе крана.

Однако данная система уравнений не описывает потери в узлах механической системы, учет которых является дальнейшим направлением развития тематики анализа движения механизмов мостового крана.

Список литературы

1. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины: учебник для машиностроит. спец. вузов. 6-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 1985. 520 с.: ил.
2. Масандилов Л.Б. Электропривод подъемных кранов. М.: Изд-во МЭИ, 1998. 100 с. ISBN 5-7046-0227-4
3. Характеристики крановых электроприводов с несимметричными сопротивлениями в цепи ротора / Омельченко Е.Я., Сулейманов Р.Р., Енин С.С., Полетаевкин А.А. //

- Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. №4. С. 19-25. (рецензируемое издание № 2189).
4. H. Goldstein, C. Poole, J. Safko. Classical Mechanics. Third Edition. Columbia University, University of South Carolina, 2000.
 5. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. Изд. 20-е, стер. М.: Высш. шк., 2010. 416 с. ISBN 978-5-06-006193-2
 6. Курс теоретической механики: учебник для вузов / В.И. Дронг, В.В. Дубинин, М.М. Ильин и др.; под общ. ред. К.С. Колесникова. 3-е изд., стер. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 736 с.: ил. (Сер. Механика в техническом университете; Т. 1).
 7. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. 1-е издание, 2007 год, 288 стр., формат 17x24 см, мягкая обложка, ISBN 978-5-388-00020-0
 8. Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. Modern Control Systems, 13th Edition. 2017. ISBN-13: 9780134407623

Поступила 12.04.17.

Принята в печать 25.07.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-68-73>

THE MOTION OF BRIDGE CRANE MECHANISMS DESCRIBED WITH THE HELP OF LAGRANGE'S EQUATIONS OF SECOND KIND

Sergei S. Enin – Assistant Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: enin_ss@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0313-6854>

Evgenii Ya. Omelchenko – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Alexei V. Belyi – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Nikolai V. Fomin – Assistant Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstract

Problem Statement (Relevance): This article analyses the motion of a three-mass system of bridge crane mechanisms. The relevance of this work is in the application of Lagrange's equations of second kind, which helped describe the system motion. Due to this approach, the authors could study the dynamic behaviour of the crane mechanisms since dynamic loads appear to be the prevailing cause of crane failures. **Objectives:** The objective of this research is to obtain the equations of motion for the bridge crane mechanisms, which can be used for mathematical and computer modelling of electrical drives for crane applications. **Methods Applied:** The analysis (of the bridge crane) conducted is based on combining separate mechanisms into a three-mass system in order to derive the dependencies of velocity and acceleration rates from other physical and process parameters. **Originality:** The mechanisms of a bridge crane are not examined as separate components but as an intergrated system where all the constituents influence each other. To describe the system motion without any simplifications, Lagrange's equations of second kind were applied. This indicates that the obtained description offers high accuracy. **Findings:** The article defines the generalized coordinates of the lifting mechanism, the trolley and the bridge. The kinetic energy of the mechanical system was determined, and the generalized forces found that impact each mechanism. Lagrange's equations of second kind were derived for each generalized coordinate. Equations of motion were derived for each component that prove the interrelated nature of the components. **Practical Relevance:** The authors indicate other

possible applications for these equations for further study of bridge cranes. The derived equations can be used to build accurate mathematical and computer models, which can help learn more about the motion of bridge crane mechanisms.

Keywords: Bridge crane, Lagrange's equation of second kind, generalized coordinate, kinetic energy of the system, generalized force, equation of the system motion.

References

1. Aleksandrov M.P. *Podyemno-transportnye mashiny: Ucheb. dlya mashinostroit. vuzov* [Handling machinery: Textbook for engineering universities]. 6th edition, revised. Moscow: Vysshaya Shkola, 1985, 520 p. (In Russ.)
2. Masandilov L.B. *Electroprivod podzemnykh kranov* [Electrical drives for crane applications]. Moscow: Publishing House of Moscow Power Engineering Institute, 1998, 100 p. ISBN 5-7046-0227-4 (In Russ.)
3. Omelchenko E.Ya., Suleymanov R.R., Enin S.S., Poletavkin A.A. Speed-torque characteristics of crane electrical drives with unbalanced impedances in the rotor circuit. *Electrooborudovanie: expluatatcia i remont* [Electrical equipment: operation and maintenance], 2014, no. 4, pp. 19–25. (In Russ.)
4. H. Goldstein, C. Poole, J. Safko. Classical Mechanics. Third Edition. Columbia University, University of South Carolina, 2000.
5. Targ S.M. *Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhaniki* [Brief course in theoretical mechanics]. 20th edition. Moscow: Vysshaya Shkola, 2010, 416 p. ISBN 978-5-06-006193-2 (In Russ.)
6. Dronг V.I., Dubinin V.V., Ilyin M.M. et al. *Kurs teoret-*

icheskoj mekhaniki: Uchebnik dlya vuzov [A course in theoretical mechanics: Textbook for university students]. 3rd edition, ed. by K.S. Kolesnikov. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2005, 736 p. (In Russ.)

7. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotehnicheskikh*

ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. [Simulation of electrical components in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. 1st edition, 2007, 288 p. ISBN 978-5-388-00020-0

8. Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. *Modern Control Systems*, 13th Edition. 2017. ISBN-13: 9780134407623

Received 12/04/17

Accepted 25/07/17

Образец для цитирования

Описание движения механизмов мостового крана уравнениями Лагранжа II рода / Енин С.С., Омельченко Е.Я., Белый А.В., Фомин Н.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 68–73. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-68-73>

For citation

Enin S.S., Omelchenko E.Ya., Bely A.V., Fomin N.V. The motion of bridge crane mechanisms described with the help of lagrange's equations of second kind. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 68–73. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-68-73>

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.365.22 + 621.311.16

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-74-94>

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ ВЫБОРА МОЩНОСТИ СТАТИЧЕСКОГО ТИРИСТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Николаев А.А.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация

Актуальность работы. Статические тиристорные компенсаторы являются важным элементом систем электрообеспечения мощных электросталеплавильных комплексов металлургических предприятий, построенных на базе дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь. При их использовании достигается номинальная производительность электросталеплавильных агрегатов за счет поддержания напряжения на первичной стороне печных трансформаторов, а также обеспечивается поддержание заданных показателей качества электроэнергии в точке общего присоединения комплекса и других электроприемников. На сегодняшний день в российской и зарубежной научной литературе не описаны методики выбора мощности элементов статического тиристорного компенсатора, которые бы учитывали характер несимметричных режимов работы дуговых сталеплавильных печей различного класса. Существующие методики, используемые основными производителями компенсирующих устройств для дуговых сталеплавильных печей, в ряде случаев выдают завышенное значение номинальной мощности фильтрокомпенсирующей цепи и тиристорно-реакторной группы, что приводит к повышению стоимости установки и увеличению затрат на эксплуатацию компенсаторов из-за повышенных потерь активной мощности в элементах компенсатора. В связи с этим актуальной задачей является разработка нового подхода к выбору мощности статического тиристорного компенсатора, основанного на анализе характера изменения симметричных составляющих токов дуговой сталеплавильной печи на различных стадиях плавки. **Цель работы** – разработка усовершенствованной методики выбора мощности элементов статического тиристорного компенсатора дуговой сталеплавильной печи с использованием экспериментальных данных об изменении симметричных составляющих токов, обеспечивающей точный расчет параметров компенсатора без завышения установленной мощности компенсирующего устройства. **Используемые методы:** в качестве основной исходной информации при выполнении теоретических исследований были использованы массивы мгновенных значений токов и напряжений электросталеплавильных агрегатов различной мощности и класса; обработка данных осуществлялась в математическом пакете Matlab с приложением Simulink, где с помощью метода симметричных составляющих осуществлялся анализ действительных и мнимых частей токов прямой и обратной последовательностей дуговых сталеплавильных печей; для определения значимых диапазонов изменения электрических параметров исследуемых электросталеплавильных агрегатов были использованы методы теории вероятности и математической статистики. **Новизна:** результаты исследования являются новыми, т.к. впервые был проведен комплексный анализ несимметричных режимов дуговых сталеплавильных печей различного класса, на основании которого разработана новая усовершенствованная методика выбора мощности компенсирующего устройства, обеспечивающая более точный расчет параметров компенсатора по сравнению с существующими методиками. **Полученные результаты:** установлены закономерности изменения симметричных составляющих токов дуговых сталеплавильных печей; показано влияние несимметричных режимов на требуемые значения реактивных проводимостей и суммарной мощности компенсатора дуговой печи; получены статистические данные о распределении симметричных составляющих токов дуговых сталеплавильных печей различного класса и мощности; разработана новая методика выбора мощности статического тиристорного компенсатора дуговой сталеплавильной печи. **Практическая значимость.** Полученные результаты исследований имеют большую теоретическую значимость для электротехники дуговых сталеплавильных печей и могут найти практическое применение при расчете параметров статических тиристорных компенсаторов, функционирующих в системах электроснабжения электросталеплавильных комплексов.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, установка ковш-печь, статический тиристорный компенсатор, компенсация реактивной мощности, качество электроэнергии, несимметричные режимы горения дуг, фильтрация высших гармоник, выбор мощности компенсирующего устройства.

© Николаев А.А., 2017

Введение

В настоящее время в России и во всем мире электросталеплавильное производство развивается быстрыми темпами. Практически все крупные металлургические предприятия имеют в своем составе электросталеплавильные комплексы, включающие в себя дуговые сталеплавильные печи (ДСП) и установки ковш-печь (УКП) для внепечной обработки стали. Подавляющее большинство новых металлургических мини-заводов, строящихся в России и за рубежом с производительностью 0,5–2,5 млн т стали в год, имеют электросталеплавильные цеха с электродуговыми установками различной мощности: от самых малых 1,5–10 т с мощностью печного трансформатора 2–10 МВА до мощных и сверхмощных 120–250-тонных ДСП с трансформаторами 80–300 МВА [1–2].

В случае применения мощных электросталеплавильных комплексов важным условием обеспечения оптимальных электрических характеристик дуговой печи является использование в системе электроснабжения (СЭС) статического компенсатора реактивной мощности (СКРМ), который обеспечивал бы сохранение уровня напряжения на высокой стороне печного трансформатора на всех стадиях плавки в ДСП и поддерживал бы заданные показатели качества электроэнергии (ПКЭ) в точке общего присоединения.

В настоящее время основным типом СКРМ для электродуговых печей являются статические тиристорные компенсаторы (СТК), состоящие из регулируемого источника индуктивного тока – тиристорно-реакторной группы (ТРГ), а также нерегулируемого источника емкостного тока – фильтрокомпенсирующей цепи (ФКЦ) в составе фильтров высших гармоник. Также необходимо отметить, что с начала 2000-х годов производители компенсирующих устройств начали внедрять в промышленную эксплуатацию новое поколение статических компенсаторов СТАТКОМ, построенных на базе управляемых источников напряжения [1–8]. Однако данные типы преобразователей не получили широкого применения в системах электроснабжения электросталеплавильных комплексов. По данным компании АВВ, за последние 20 лет с момента первого применения компенсатора СТАТКОМ в промышленности только 13% от общего количества СКРМ были выполнены по данной схеме [2]. Это обуслов-

лено более высокой стоимостью по сравнению с традиционным СТК и отсутствием целесообразности применения данных типов компенсаторов в системах электроснабжения мощных электросталеплавильных комплексов, где для питания ДСП и УКП применяются отдельные подстанции глубокого ввода. В данном случае СТК являются наиболее предпочтительным техническим решением, поскольку они обладают достаточным быстродействием и выполняют все необходимые функции по компенсации реактивной мощности комплекса, поддержанию заданной производительности агрегатов и обеспечению нормативных ПКЭ в точке общего присоединения электроприемников.

Несмотря на почти 40-летнюю историю применения СТК в промышленности, остается нерешенным ряд вопросов, связанных с выбором мощности и расчетом параметров СТК для электродуговых печей и выбором оптимальных алгоритмов управления компенсатором. Появление дуговых печей сверхвысокой мощности (150–300 МВА), а также ДСП с новыми технологиями ведения плавки (шахтные печи, печи с технологией непрерывной подачи лома в жидкую ванну (технология Consteel), применение альтернативных источников энергии, вспененного шлака, использование жидкого чугуна и т.д.) потребовало пересмотра основных положений в методиках выбора параметров СТК.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день отсутствуют точные методики выбора установленной мощности СТК на стадии проектирования систем электроснабжения ДСП. Данная задача затруднена отсутствием достоверной информацией об электрических режимах работы будущей ДСП, которые зависят как от технологических особенностей (качество металлолома, шихтовка плавки и т.д.), так и от настроек и режимов работы системы автоматического управления положением электродов. Ситуация усугубляется тем, что характер изменения токов, активной и реактивной мощности ДСП является случайным и не поддается точному прогнозированию и математическому описанию в виде функциональных зависимостей. Сильные несимметричные режимы, возникающие в процессе работы ДСП на начальной стадии плавки из-за постоянного изменения длин дуг также сложно оценить без проведения экспериментальных исследований уже на функционирующем

оборудовании. Анализ установленной мощности для большого количества СТК, функционирующих на металлургических предприятиях России и зарубежья, показал, что наблюдается общая тенденция, при которой мощность СТК на 10–60% превышает мощность печного трансформатора [1–2].

Существующие методики расчета параметров СТК [9–15] из-за недостатка исходной информации используют упрощенные подходы к определению мощности ТРГ и ФКЦ. Например, в одних методиках используются различные эмпирические характеристики, связывающие коэффициент подавления фликера с воздействием системы управления и установленной мощностью ТРГ, в других – анализируются примерные графики электрических нагрузок по активной и реактивной мощности ($P_{ДСП}(t)$ и $Q_{ДСП}(t)$), предоставленные фирмой-изготовителем ДСП, и определяется максимальная величина реактивной мощности $Q_{ДСП, \max}$, в третьих – на основе параметров питающей сети (мощности короткого замыкания в точке подключения ДСП $S_{КЗ}$), известных электрических параметров ДСП (мощность трансформатора $S_{НОМ}$, кратность тока короткого замыкания $I_{КЗ}/I_{НОМ}$, дисперсии токов дуг на стадии расплавления $D(I_{ДСП})$) рассчитывается установленная мощность компенсирующего устройства $Q_{СТК}$. Все они могут дать лишь приближенную оценку необходимой мощности компенсирующего устройства, поскольку не учитывают эксплуатационные несимметричные режимы на разных стадиях плавки, которые оказывают существенное влияние на режимы функционирования СТК. В результате чего мощность компенсатора на стадии проектирования системы электроснабжения ДСП может оказаться завышенной, что приводит к удорожанию установки и повышению затрат на эксплуатацию из-за завышенных потерь активной мощности в элементах СТК.

Исходя из вышесказанного, актуальной задачей является разработка нового подхода к выбору мощности статического тиристорного компенсатора, основанного на анализе характера изменения симметричных составляющих токов дуговой сталеплавильной печи на различных стадиях плавки с учетом особенностей различных технологий плавления металлошихты, таких как: 1) ДСП с традиционной технологией бадьевого загрузки лома при отведенном своде; 2) ДСП шахтного типа с пред-

варительным подогревом шихты на пальцах (шахтные печи); 3) ДСП с конвейерной подачей металлошихты в жидкую ванну.

1. Исследование влияния несимметрии токов ДСП на режимы работы СТК

Для оценки влияния несимметричных режимов работы ДСП на номинальную мощность СТК необходимо провести углубленный анализ принципов функционирования компенсатора при совместной работе с несимметричной активно-индуктивной нагрузкой.

На рис. 1 приведена схема замещения комплекса «ДСП-СТК», в которой нагрузка ДСП упрощенно представлена в виде комплексных проводимостей $Y_{ДСПАВ}$, $Y_{ДСПВС}$ и $Y_{ДСПСА}$, соединенных в треугольник. Активные и реактивные проводимости $G_{ДСПАВ, ВС, СА}$ и $-jB_{ДСПАВ, ВС, СА}$ по определению не равны друг другу и определяются несимметричным режимом горения дуг в ДСП. Статический тиристорный компенсатор на схеме замещения представлен в виде эквивалентного треугольника реактивных проводимостей $\pm jB_{СТКАВ}$, $\pm jB_{СТКВС}$ и $\pm jB_{СТКСА}$ емкостно-индуктивного характера. Диапазон изменения данных проводимостей зависит от параметров ФКЦ и ТРГ, а именно от соотношения параметров $B_{ФКЦД}$ и $B_{ТРГ \max}$. Максимальное значение реактивной проводимости фазы СТК емкостного характера определяется постоянной величиной $B_{ФКЦД}$, при этом наибольшая величина проводимости СТК индуктивного характера находится как разность $B_{ФКЦД}$ и $B_{ТРГ \max}$:

$$\begin{aligned} +jB_{СТК \max} &= jB_{ФКЦД}; \\ -jB_{СТК \max} &= jB_{ФКЦД} - jB_{СТК \max} \end{aligned} \quad (1)$$

где $B_{ТРГ \max} = 1/X_{ТРГ} = 1/\omega L_{ТРГ}$ – максимальная реактивная проводимость фазы треугольника ТРГ, зависящая от индуктивности реактора $L_{ТРГ}$; $B_{ФКЦД} = Q_{ФКЦ, \text{ном}}/3U_{\text{л.ном}}^2$ – постоянная реактивная проводимость ФКЦ, определяемая номинальной мощностью фильтрокомпенсирующей цепи $Q_{ФКЦ, \text{ном}}$ и номинальным линейным напряжением $U_{\text{л.ном}}$.

Значение $B_{ТРГ}$ изменяется в диапазоне от 0 до $B_{ТРГ \max}$ в соответствии со следующим выражением:

$$B_{ТРГ}(\alpha) = B_{ТРГ \max} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right), \quad (2)$$

где α – угол управления тиристорными ключами.

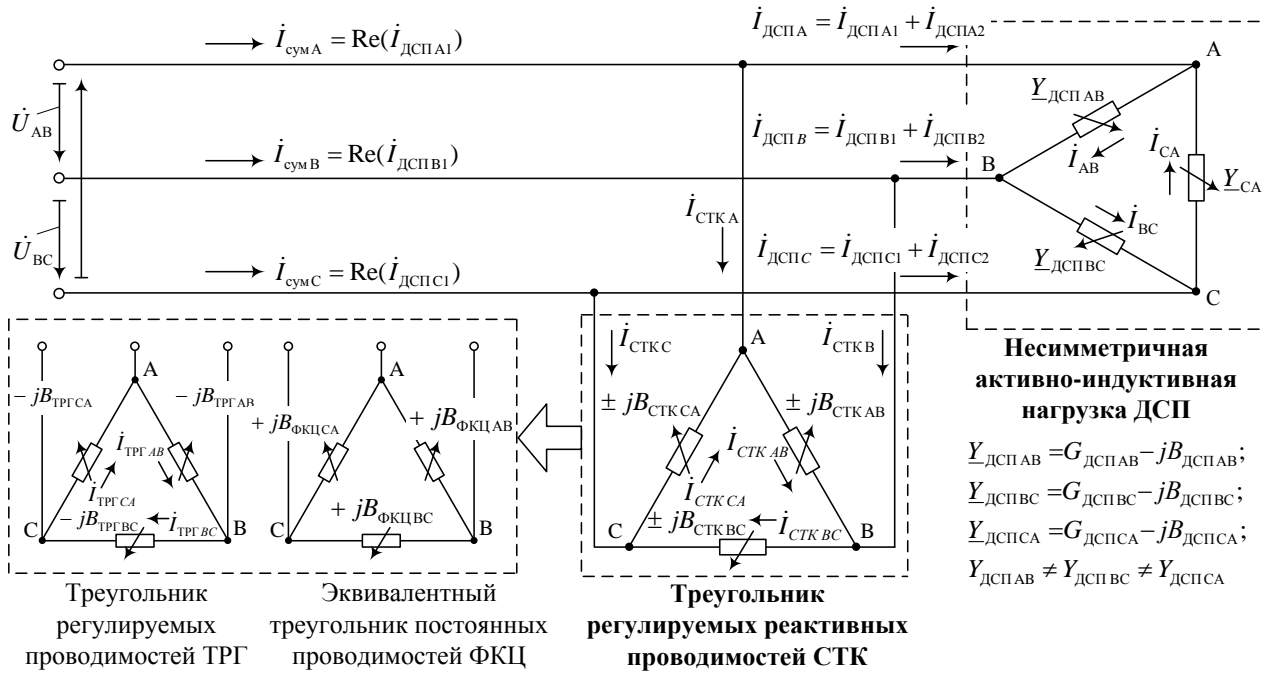


Рис. 1. Схема замещения комплекса «ДСП-СТК»

В соответствии с общепринятыми алгоритмами управления СТК за счет пофазного регулирования реактивных проводимостей $\pm jB_{СТКАВ}$, $\pm jB_{СТКBC}$ и $\pm jB_{СТКСА}$ должен обеспечивать полную компенсацию активной и реактивной составляющих тока обратной последовательности ДСП, а также устранение реактивной составляющей тока прямой последовательности дуговой печи [8]:

$$\text{Im}(i_{ДСП1}) + \text{Im}(i_{СТК1}) = 0; \tag{3}$$

$$\text{Re}(i_{ДСП2}) + \text{Re}(i_{СТК2}) = 0; \tag{4}$$

$$\text{Im}(i_{ДСП2}) + \text{Im}(i_{СТК2}) = 0 \tag{5}$$

где $i_{ДСП1}$, $i_{ДСП2}$, $i_{СТК1}$, $i_{СТК2}$ – комплексы токов прямой и обратной последовательностей ДСП и СТК.

Согласно выражениям (3)–(5) требуемые проводимости фаз эквивалентного треугольника СТК для любого несимметричного режима работы ДСП будут равны [8]:

$$B_{СТКАВ} = -\frac{\sqrt{3}}{3U_{AB}} \times [\text{Im}(i_{ДСП1}) - \sqrt{3} \text{Re}(i_{ДСП2}) + \text{Im}(i_{ДСП2})] = -\frac{\sqrt{3}}{3U_{AB}} \cdot [I_{1q} - \sqrt{3}I_{2d} + I_{2q}]; \tag{6}$$

$$B_{СТКBC} = -\frac{\sqrt{3}}{3U_{BC}} \times [\text{Im}(i_{ДСП1}) - 2\text{Im}(i_{ДСП2})] = -\frac{\sqrt{3}}{3U_{AB}} \cdot [I_{1q} - 2I_{2q}]; \tag{7}$$

$$B_{СТКСА} = -\frac{\sqrt{3}}{3U_{CA}} \times [\text{Im}(i_{ДСП1}) + \sqrt{3} \text{Re}(i_{ДСП2}) + \text{Im}(i_{ДСП2})] = -\frac{\sqrt{3}}{3U_{AB}} \cdot [I_{1q} + \sqrt{3}I_{2d} + I_{2q}] \tag{8}$$

где $\text{Im}(i_{ДСП1})$ – мнимая составляющая тока прямой последовательности ДСП; $\text{Re}(i_{ДСП2})$ и $\text{Im}(i_{ДСП2})$ – действительная и мнимая составляющие тока обратной последовательности ДСП; U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} – линейные напряжения на первичной стороне печного трансформатора ДСП.

В современных системах управления СТК, например в системе управления МАСН2 фирмы АВВ, в качестве основных параметров для расчета требуемых реактивных проводимостей используются ортогональные составляющие токов ДСП I_{1q} , I_{2d} и I_{2q} во вращающейся системе координат $d-q$ [2]. Данные параметры рассчитываются с использованием координатных преобразователей abc/dq и специализированных блоков фазовой автопод-

стройки частоты ФАПЧ (PLL – phase-locked loop), формирующих опорный сигнал для работы блока преобразования. После фильтрации данные сигналы преобразуются в заданные проводимости СТК в соответствии с выражениями (6)–(8). В этом случае параметры I_{1q} , I_{2d} и I_{2q} идентичны переменным $\text{Im}(I_{ДСП1})$, $\text{Re}(I_{ДСП2})$ и $\text{Im}(I_{ДСП2})$.

При заданной номинальной мощности и проводимостей фаз ФКЦ можно определить требуемые проводимости фаз ТРГ:

$$\begin{aligned} B_{\text{ТРГАВ}} &= B_{\text{СТКАВ}} - B_{\text{ФКЦАВ}} = \\ &= -(B_{\text{СТКАВ1}} + B_{\text{ФКЦ}}) + B_{\text{СТКАВ2}} = \\ &= B_{\text{ТРГАВ1}} + B_{\text{ТРГАВ2}} = \\ &= -\left[\frac{\sqrt{3}}{3U_{\text{АВ}}} \text{Im}(i_{\text{ДСП1}}) + \frac{Q_{\text{ФКЦ.ном.}}}{3U_{\text{л.ном.}}^2} \right] + \\ &+ \frac{\sqrt{3}}{3U_{\text{АВ}}} \left[\sqrt{3}\text{Re}(i_{\text{ДСП2}}) - \text{Im}(i_{\text{ДСП2}}) \right]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} B_{\text{ТРГВС}} &= B_{\text{СТКВС}} - B_{\text{ФКЦВС}} = \\ &= -(B_{\text{СТКВС1}} + B_{\text{ФКЦ}}) + B_{\text{СТКАВ2}} = \\ &= B_{\text{ТРГАВ1}} + B_{\text{ТРГАВ2}} = \\ &= -\left[\frac{\sqrt{3}}{3U_{\text{АВ}}} \text{Im}(i_{\text{ДСП1}}) + \frac{Q_{\text{ФКЦ.ном.}}}{3U_{\text{л.ном.}}^2} \right] + \\ &+ \frac{2\sqrt{3}}{3U_{\text{ВС}}} \text{Im}(i_{\text{ДСП2}}); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} B_{\text{ТРГСА}} &= B_{\text{СТКА}} - B_{\text{ФКЦСА}} = \\ &= (B_{\text{СТКА1}} - B_{\text{ФКЦСА}}) + \\ &+ B_{\text{СТКА2}} = B_{\text{ТРГСА1}} + B_{\text{ТРГСА2}} = \\ &= -\left[\frac{\sqrt{3}}{3U_{\text{СА}}} \text{Im}(i_{\text{ДСП1}}) + \frac{Q_{\text{ФКЦ.ном.}}}{3U_{\text{л.ном.}}^2} \right] - \\ &- \frac{\sqrt{3}}{3U_{\text{СА}}} \left[\sqrt{3}\text{Re}(i_{\text{ДСП2}}) + \text{Im}(i_{\text{ДСП2}}) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

где $B_{\text{СТК1}}$, $B_{\text{СТК2}}$, $B_{\text{ТРГ1}}$, $B_{\text{ТРГ2}}$ – требуемые реактивные проводимости фаз СТК и ТРГ, необходимые для компенсации прямой и обратной последовательностей; $Q_{\text{ФКЦ.ном.}}$ – номинальная мощность ФКЦ СТК; $U_{\text{л.ном.}}$ – номинальное линейное напряжение питающей сети в точке подключения комплекса «ДСП-СТК».

Анализ выражений (6)–(11) показывает, что требуемая реактивная проводимость фазы эквивалентного треугольника СТК или ТРГ включает в себя две части: 1) одинаковую для всех фаз составляющую реактивной проводимости $B_{\text{СТК1}}$ ($B_{\text{ТРГ1}}$), которая необходима для компенсации мнимой ча-

сти тока прямой последовательности ДСП $\text{Im}(I_{ДСП1})$ (функция компенсации реактивной мощности); 2) различные составляющие проводимостей $B_{\text{СТКАВ2, ВС2, СА2}}$ ($B_{\text{ТРГАВ2, ВС2, СА2}}$), необходимые для компенсации $\text{Re}(I_{ДСП2})$ и $\text{Im}(I_{ДСП2})$ (функция симметрирования токов нагрузки). По аналогии с вышесказанным можно записать выражения реактивных мощностей фаз СТК, включающие в себя составляющие для компенсации прямой и обратной последовательностей токов ДСП:

$$\begin{aligned} Q_{\text{СТКАВ}} &= Q_{\text{СТКАВ1}} + Q_{\text{СТКАВ2}} = \\ &= -\left[\frac{U_{\text{АВ}}\sqrt{3}}{3} \text{Im}(i_{\text{ДСП1}}) \right] + \\ &+ \frac{U_{\text{АВ}}\sqrt{3}}{3} \left[\sqrt{3}\text{Re}(i_{\text{ДСП2}}) - \text{Im}(i_{\text{ДСП2}}) \right]; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{СТКВС}} &= Q_{\text{СТКВС1}} + Q_{\text{СТКВС2}} = \\ &= U_{\text{ВС}}^2 \left[\frac{Q_{\text{ФКЦ.ном.}}}{3U_{\text{л.ном.}}^2} \right] + \frac{U_{\text{ВС}}\sqrt{3}}{3} \left[2\text{Im}(i_{\text{ДСП2}}) \right]; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{СТКА}} &= Q_{\text{СТКА1}} + Q_{\text{СТКА2}} = \\ &= -\left[\frac{U_{\text{СА}}\sqrt{3}}{3} \text{Im}(i_{\text{ДСП1}}) \right] - \\ &- \frac{U_{\text{СА}}\sqrt{3}}{3} \left[\sqrt{3}\text{Re}(i_{\text{ДСП2}}) + \text{Im}(i_{\text{ДСП2}}) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Реактивная мощность фаз ТРГ может быть определена следующим образом:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ТРГАВ}} &= Q_{\text{ТРГАВ1}} + Q_{\text{ТРГАВ2}} = \\ &= -\left[\frac{U_{\text{АВ}}\sqrt{3}}{3} \text{Im}(i_{\text{ДСП1}}) + \frac{U_{\text{АВ}}^2 Q_{\text{ФКЦ.ном.}}}{3U_{\text{л.ном.}}^2} \right] + \\ &+ \frac{U_{\text{АВ}}\sqrt{3}}{3} \left[\sqrt{3}\text{Re}(i_{\text{ДСП2}}) - \text{Im}(i_{\text{ДСП2}}) \right]; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{ТРГВС}} &= Q_{\text{ТРГВС1}} + Q_{\text{ТРГВС2}} = \\ &= U_{\text{ВС}}^2 \left[\frac{Q_{\text{ФКЦ.ном.}}}{3U_{\text{л.ном.}}^2} - \frac{\sqrt{3}}{3U_{\text{АВ}}} \text{Im}(i_{\text{ДСП1}}) \right] + \\ &+ \frac{U_{\text{ВС}}\sqrt{3}}{3} \left[2\text{Im}(i_{\text{ДСП2}}) \right]; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{ТРГСА}} &= Q_{\text{ТРГСА1}} + Q_{\text{ТРГСА2}} = \\ &= -\left[\frac{U_{\text{СА}}\sqrt{3}}{3} \text{Im}(i_{\text{ДСП1}}) + \frac{U_{\text{СА}}^2 Q_{\text{ФКЦ.ном.}}}{3U_{\text{л.ном.}}^2} \right] - \\ &- \frac{U_{\text{СА}}\sqrt{3}}{3} \left[\sqrt{3}\text{Re}(i_{\text{ДСП2}}) + \text{Im}(i_{\text{ДСП2}}) \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Суммарная реактивная мощность СТК и ТРГ в определенный момент времени зависит только от величины мнимой составляющей тока прямой последовательности ДСП, т.к. сумма проводимостей обратной последовательности фаз СТК и ТРГ и соответственно сумма фазных мощностей на симметрирование равна нулю:

$$\begin{aligned} Q_{\text{СТК}\Sigma} &= Q_{\text{СТКАВ1}} + Q_{\text{СТКАВ2}} + \\ &+ Q_{\text{СТКВС1}} + Q_{\text{СТКВС2}} + Q_{\text{СТКСА1}} + Q_{\text{СТКСА2}} = \\ &= Q_{\text{СТКАВ1}} + Q_{\text{СТКВС1}} + Q_{\text{СТКСА1}} \approx 3U_{\text{л1}}^2 \frac{Q_{\text{ФКЦ.ном.}}}{3U_{\text{л.ном.}}^2}, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{ТРГ}\Sigma} &= Q_{\text{ТРГАВ1}} + Q_{\text{ТРГАВ2}} + \\ &+ Q_{\text{ТРГВС1}} + Q_{\text{ТРГВС2}} + Q_{\text{ТРГСА1}} + Q_{\text{ТРГСА2}} = \\ &= Q_{\text{ТРГАВ1}} + Q_{\text{ТРГВС1}} + Q_{\text{ТРГСА1}} \approx \\ &\approx 3U_{\text{л1}}^2 \left[\frac{Q_{\text{ФКЦ.ном.}}}{3U_{\text{л.ном.}}^2} - \frac{\sqrt{3}}{3U_{\text{л(1)}}} \text{Im}(I_{\text{ДСП1}}) \right], \end{aligned} \quad (19)$$

где $U_{\text{л1}}$ – действующее значение напряжения прямой последовательности в точке подключения СТК.

На основании анализа выражений (12)–(17) можно сделать вывод, что несимметричные режимы ДСП, приводящие к появлению составляющих $\text{Re}(I_{\text{ДСП2}})$ и $\text{Im}(I_{\text{ДСП2}})$, оказывают влияние на требуемые значения реактивной мощности фаз СТК и ТРГ. В данном случае выбор мощности компенсатора должен производиться с учетом максимальных фазных значений $V_{\text{СТКАВ,ВС,СА}}$ и $Q_{\text{СТКАВ,ВС,СА}}$, определенных на основании известных величин $\text{Im}(I_{\text{ДСП1}})$, $\text{Re}(I_{\text{ДСП2}})$ и $\text{Im}(I_{\text{ДСП2}})$ (I_{1q} , I_{2d} и I_{2q}). Данные значения могут быть получены экспериментальным путем на действующих электросталеплавильных комплексах различного класса и мощности. Применение статистического анализа изменения составляющих $\text{Im}(I_{\text{ДСП1}})$, $\text{Re}(I_{\text{ДСП2}})$ и $\text{Im}(I_{\text{ДСП2}})$ делает возможным нахождение закономерностей в изменении несимметричных режимов ДСП, а также определение статистических характеристик изменения токов дуговой печи, на основании которых может быть выполнен правильный расчет мощности СТК.

2. Анализ разновидностей несимметричных режимов ДСП и оценка границ регулировочного диапазона СТК

Несимметричные электрические режимы ДСП можно разделить на два типа: статические (детерминированные) и динамические

(случайные). Первый тип обусловлен специальным введением несимметричного режима горения дуг за счет задания в системе управления перемещением электродов электродуговой печи различных уставок на импеданс (адмитанс, ток и т.д.) [3]. Причиной использования искусственного несимметричного режима могут являться различные конструктивные и технологические особенности ДСП. Так, например, в ДСП шахтного типа (шахтных печах – ШП) из-за неравномерности распределения металлошихты в рабочем объеме печи после скидывания прогретой завалки с пальцев степень экранирования дуг в основной период расплавления является разной. В этом случае для обеспечения равномерного износа футеровки стен в различных зонах шахтной печи используются искусственные несимметричные режимы горения дуг. Схожая проблема имеет место в ДСП, где применяется технология непрерывной конвейерной подачи металлошихты в жидкую ванну печи, например, ДСП с технологией Consteel производства компании Danieli. В данных печах требуется обеспечить максимальную мощность дуг в зоне завалки шихты с конвейера, а также уменьшить излучение дуг на отдаленной фазе с целью снижения теплового воздействия на футеровку.

Второй тип несимметричных режимов обусловлен случайными изменениями длин дуг. Характер данной несимметрии сильно изменяется в течение цикла плавки. На степень несимметрии в данном случае влияют: 1) качество настройки системы управления перемещением электродов ДСП; 2) параметры металлошихты и способ ее загрузки в рабочий объем печи; 3) технология ведения плавки; 4) использование жидкого чугуна и режимы работы стеновых газокислородных и РСВ-горелок на стадии расплавления металлошихты.

На основе разработанной математической модели комплекса «ДСП-СТК» [2, 3] было проведено исследование возможных границ изменения симметричных составляющих токов ДСП. В качестве примера был взят электросталеплавильный комплекс на базе 125-тонной дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125 (85 МВА), функционирующей в электросталеплавильном цехе АО «Северсталь – Сортной завод Балаково» (АО «ССЗБ»), г. Балаково Саратовской обл.

На рис. 2 приведены возможные границы изменения действующих значений токов прямой и последовательностей I_1 и I_2 (рис. 2, а), а также границы их вещественных и мнимых

составляющих $\text{Re}(\dot{I}_1)$ и $\text{Im}(\dot{I}_1)$ (рис. 2, б), $\text{Re}(\dot{I}_2)$ и $\text{Im}(\dot{I}_2)$ (рис. 2, в). Значения приведены в относительных единицах. За базовую величину $I_{\text{баз}}=3082$ А было принято максимальное значение тока трехфазного короткого замыкания на первичной стороне трансформатора для наибольшей из используемых рабочих ступеней РПН и заданной индуктивности реактора. Как видно из рис. 2, а, область возможных значений I_1 и I_2 электродуговой печи ограничена квазитреугольником с вершинами 1–3. Точка 1 соответствует режиму отсутствия дуг во всех трех фазах, точка 2 – режиму двухфазного КЗ при обрыве дуги в третьей фазе, а точка 3 – режиму трехфазного КЗ. Участок 1–2 соответствует режиму работы на двух дугах с обрывом дуги в третьей фазе, участок 2–3 – режиму двухфазного КЗ с изменением длины дуги в третьей фазе, участок 1–3 – симметричному токовому режиму. Диапазон изменения коэффициента несимметрии токов по обратной последовательности для ДСП составляет $K_{21} = 100\% \cdot I_2/I_1 = 0 \div 100\%$. На рис. 2, б и в показаны границы изменения действительной и мнимой составляющих токов прямой и обратной последовательностей. Как видно из рисунка, мнимая составляющая прямой последовательности тока $\text{Im}(\dot{I}_1)$ принимает только отрицательные значения, что обусловлено активно-индуктивным характером нагрузки электродуговой печи. Составляющая $\text{Re}(\dot{I}_1)$ принимает только положительные значения. Область значений $\text{Im}(\dot{I}_1) = f(\text{Re}(\dot{I}_1))$ ограничена кривыми 1–2, 2–3 и 1–3. Участок 1–3 для симметричного режима повторяет форму круговой диаграммы ДСП $Q_{\text{ДСП}} = f(P_{\text{ДСП}})$. Соотношения между $\text{Im}(\dot{I}_1)$ и $\text{Re}(\dot{I}_1)$ в точках 2 и 3 определяют коэффициенты реактивной мощности $\text{tg}\varphi$ по прямой последовательности для режимов двухфазного и трехфазного КЗ. Необходимо отметить, что как для первого, так и для второго случаев принадлежность фаз в несимметричном режиме не оказывает влияния на форму границ областей $I_2 = f(I_1)$ и $\text{Im}(\dot{I}_1) = f(\text{Re}(\dot{I}_1))$. Обратная ситуация наблюдается с областью изменения составляющих $\text{Im}(\dot{I}_2)$ и $\text{Re}(\dot{I}_2)$ (рис. 2, в), которая имеет форму трилистника, образованного шестью кривыми: 1–2.1, 2.1–3, 1–2.2, 2.2–3, 1–2.3, 2.3–3. В зависимости от того, в какой из фаз электродуговой печи происходит изменение длины дуги, рабочая точка будет находиться в разных квадрантах. В этом случае в процессе работы ДСП параметры $\text{Im}(\dot{I}_1)$ и $\text{Re}(\dot{I}_1)$ могут принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Граничные режимы работы СТК зависят от максимальной реактивной проводимости ТРГ $B_{\text{ТРГmax}}$ и проводимости ФКЦ $B_{\text{ФКЦ}}$. Условием работы СТК в регулировочном диапазоне является выполнение следующей системы неравенств:

$$\begin{cases} -jB_{\text{СТКmax}} \leq \pm jB_{\text{СТК.АВ.треб.}} \leq +jB_{\text{СТКmax}} \\ -jB_{\text{СТКmax}} \leq \pm jB_{\text{СТК.ВС.треб.}} \leq +jB_{\text{СТКmax}} \\ -jB_{\text{СТКmax}} \leq \pm jB_{\text{СТК.СА.треб.}} \leq +jB_{\text{СТКmax}} \end{cases}, \quad (20)$$

где $B_{\text{СТК.АВ.треб.}}$, $B_{\text{СТК.ВС.треб.}}$, $B_{\text{СТК.СА.треб.}}$ – требуемые реактивные проводимости фаз эквивалентного треугольника СТК в каждый момент времени работы электродуговой печи.

Для рассматриваемой ШП-125 на рис. 2, а–в обозначены границы работы СТК мощностью 135 МВАр, функционирующего в системе электроснабжения электросталеплавильного комплекса. Также на рис. 2 нанесены области распределения фактических рабочих точек ШП-125 за время работы под током без учета технологических пауз для всех стадий цикла плавки. Фактические рабочие точки получены на основании обработки массивов мгновенных значений токов и напряжений на первичной стороне печного трансформатора ШП-125 с высокой частотой дискретизации 4 кГц. Как видно из рисунка, подавляющая часть рабочих точек ШП-125 находится внутри области работы СТК, при этом математические ожидания составляющих $\text{Re}(\dot{I}_1)$, $\text{Im}(\dot{I}_1)$, $\text{Re}(\dot{I}_2)$, $\text{Im}(\dot{I}_2)$ значительно удалены от граничной области, выделенной пунктирной кривой.

На рис. 3 приведены графики изменения составляющих полной мощности ($S_{\text{ШП}}(t)$, $P_{\text{ШП}}(t)$, $Q_{\text{ШП}}(t)$), а также действующих значений ($I_1(t)$, $I_2(t)$), вещественных и мнимых составляющих ($\text{Re}(\dot{I}_1(t))$, $\text{Im}(\dot{I}_1(t))$, $\text{Re}(\dot{I}_2(t))$, $\text{Im}(\dot{I}_2(t))$) токов прямой и обратной последовательностей ШП-125 за полный цикл плавки. На основании данных графиков были построены области распределения рабочих точек, указанных ранее на рис. 2. На графиках обозначены характерные периоды плавки (исследуемые интервалы) ИИ1 и ИИ2, соответствующие начальной стадии расплавления шихты и стадии доводки металла. Интервал ИИ3 соответствует времени работы ШП-125 от момента первого включения печного трансформатора до момента начала операции выпуска металла. На графиках обозначены средние значения параметров за время работы под током ШП-125, рассчитанные без учета пауз. Также на графиках отмечены максимальные значения.

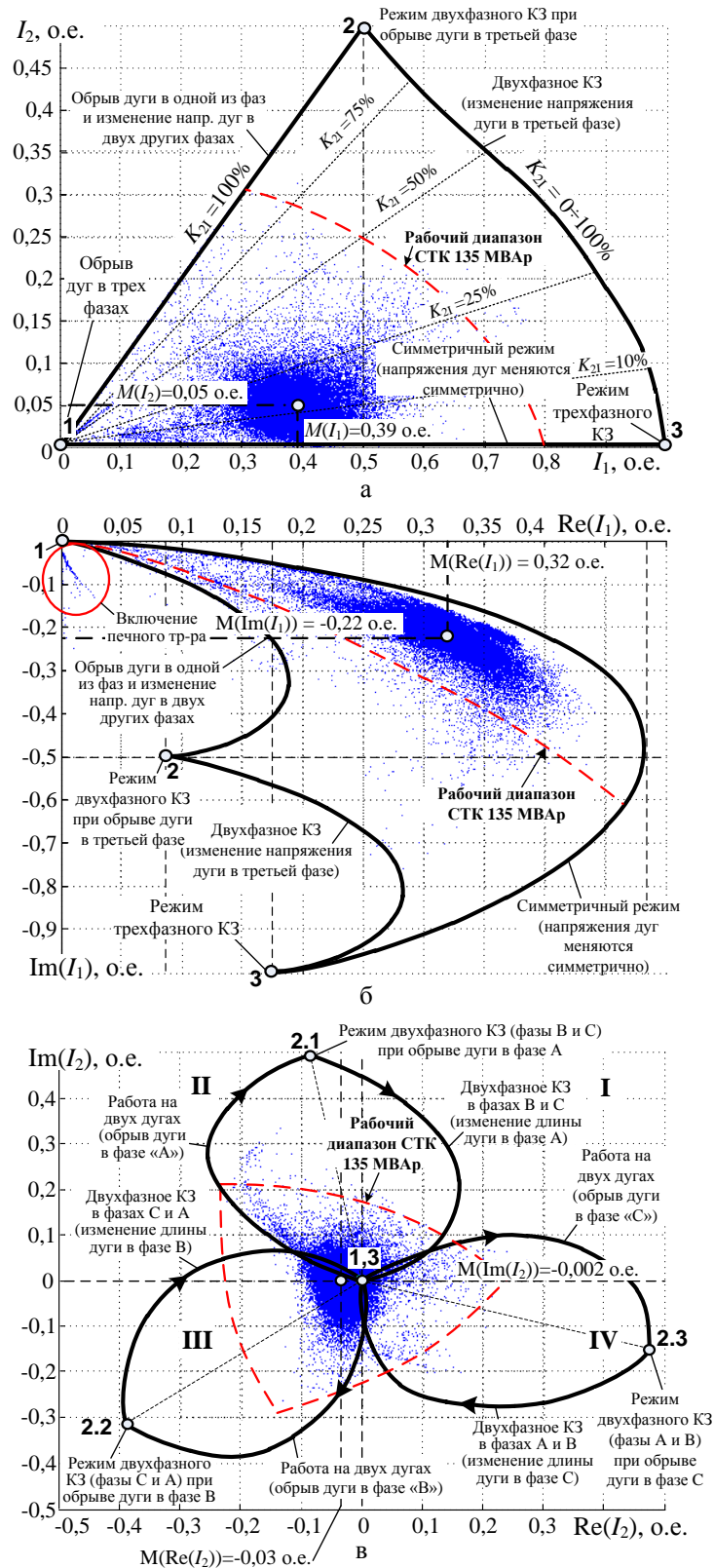


Рис. 2. Возможные границы изменения симметричных составляющих токов ШП-125 с указанием фактических рабочих точек за цикл плавки и границ рабочего диапазона СТК 135 МВАр:
 а – область изменения действующих значений токов прямой и обратной последовательностей;
 б – область изменения действительной и мнимой составляющей тока прямой последовательности;
 в – область изменения действительной и мнимой составляющей тока обратной последовательности

На основании параметров $\text{Im}(\dot{I}_1(t))$, $\text{Re}(\dot{I}_2(t))$, $\text{Im}(\dot{I}_2(t))$ на рис. 3, е–з и выражений (6)–(19) были восстановлены графики изменения требуемых реактивных проводимостей и мощностей ТРГ и ФКЦ СТК 135 МВАр для ШП-125 (85 МВА) (рис. 4). Для реактивных проводимостей фаз СТК и ТРГ были показаны графики суммарных значений $V_{\text{ТРГ.АВ,ВС,СА}}(t)$ и $V_{\text{СТК.АВ,ВС,СА}}(t)$ (рис. 4, а–в), а также их составляющие $V_{\text{ТРГ.АВ1,ВС1,СА1}}(t)$, $V_{\text{СТК.АВ1,ВС1,СА1}}(t)$, $V_{\text{ТРГ.АВ2,ВС2,СА2}}(t)$, $V_{\text{СТК.АВ2,ВС2,СА2}}(t)$, необходимые для компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузки электродуговой печи (рис. 4, д–ж). На этих графиках, согласно параметрам действующего СТК 135 МВАр, обозначены граничные проводимости $V_{\text{ФКЦД}}$ и $V_{\text{ТРГ.макс}}$. На рис. 4, г и з показаны суммарные мощности ТРГ $Q_{\text{ТРГ}\Sigma}(t)$, $Q_{\text{ФКЦ}}(t)$, $Q_{\text{СТК}\Sigma}(t)$ и составляющие $Q_{\text{ТРГ}\Sigma 1,2}(t)$ и $Q_{\text{СТК}\Sigma 1,2}(t)$, рассчитанные в соответствии с (19) и (20).

Как видно из рис. 4, СТК 135 МВАр работает в регулировочном диапазоне в том случае, когда значения $V_{\text{СТК.АВ,ВС,СА}}(t)$ не выходят за границы $-jV_{\text{СТК.макс}}$ и $+jV_{\text{СТК.макс}}$, определенные с использованием выражения (1). Как было показано на рис. 2, установленной мощности СТК достаточно для симметрирования большинства эксплуатационных несимметричных режимов ШП-125, что также подтверждается графиками на рис. 4, а–в и д–ж, из которых видно, что большую часть времени требуемые значения проводимостей $V_{\text{ТРГ.АВ,ВС,СА}}(t)$ и $V_{\text{СТК.АВ,ВС,СА}}(t)$ не выходят за граничные значения. За цикл плавки присутствует только несколько участков времени, когда условие (1) нарушается. Данные участки нанесены на графики и обозначены как 1.1–1.4, 2.1–2.3 и 3.1–3.2.

Из графиков на рис. 4, д–е наглядно виден вклад несимметричных режимов электродуговой печи в повышение требуемой мощности компенсатора. Составляющие $V_{\text{СТК.АВ2,ВС2,СА2}}(t)$, необходимые для симметрирования электрической нагрузки ШП-125, на начальной стадии расплавления металлошихты по своей величине сопоставимы с основными реактивными проводимостями $V_{\text{СТК.АВ1,ВС1,СА1}}(t)$, используемыми для устранения мнимой компоненты тока прямой последовательности дуговой печи.

Для количественной оценки симметрирующей способности СТК был введен коэффициент симметрирования $K_{\text{сим}}$, определяемый как отношение количества рабочих точек дуговой печи $N_{\text{раб}}$, попадающих в область устойчивой работы СТК, к общему количеству точек $N_{\text{сум}}$ за обобщенный цикл плавки:

$$K_{\text{сим}} = \frac{N_{\text{раб}}}{N_{\text{сум}}} \cdot 100\%. \quad (21)$$

В исследованиях [2, 16] показано, что для обеспечения нормальных режимов работы ДСП и сохранения основных показателей качества электроэнергии на секциях электросталеплавильного комплекса в соответствии с ГОСТ 32144-2013, таких как медленные изменения напряжения $\delta U_{(\pm)}$, кратковременная и длительная дозы фликера P_{St} и P_{Lr} , коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , достаточно, чтобы значение $K_{\text{сим}}$ составляло 90–95%. Поддержание таких показателей, как суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U и коэффициенты n -х гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ зависят от правильности выбора параметров фильтров высших гармоник СТК. Исследования, посвященные данному вопросу, приведены в источниках [2, 12–15]. Также необходимо отметить, что на показатели P_{St} и P_{Lr} , помимо условий работы СТК в регулировочном диапазоне, значительное влияние оказывает быстрое действие прямого канала регулирования системы управления СТК [2, 12–19].

Необходимо отметить, что достижение $K_{\text{сим}} = 100\%$ на практике не является оправданным из-за значительного завышения мощности СТК. Требуемое значение коэффициента симметрирования зависит от мощности электросталеплавильного комплекса и конфигурации его системы электроснабжения. Так, например, для дуговых печей высокой и сверхвысокой мощности, имеющих отдельную подстанцию глубокого ввода (ПГВ), задача поддержания требуемых показателей качества электроэнергии на среднем напряжении в точке подключения комплекса «ДСП-СТК» не является первостепенной из-за отсутствия других чувствительных электроприемников. В этом случае значение $K_{\text{сим}}$ может быть равно 85–90%. Для установок электродуговых установок средней и малой мощности, имеющих в точке общего присоединения на среднем уровне напряжения параллельно работающие чувствительные электроприемники, задача поддержания заданных ПКЭ является первостепенной, и к СТК предъявляются более жесткие требования по ограничению дозы фликера, несимметрии и несинусоидальности напряжения [2]. В этом случае СТК должен сохранять работу в регулировочном диапазоне при 95% времени работы под током ДСП.

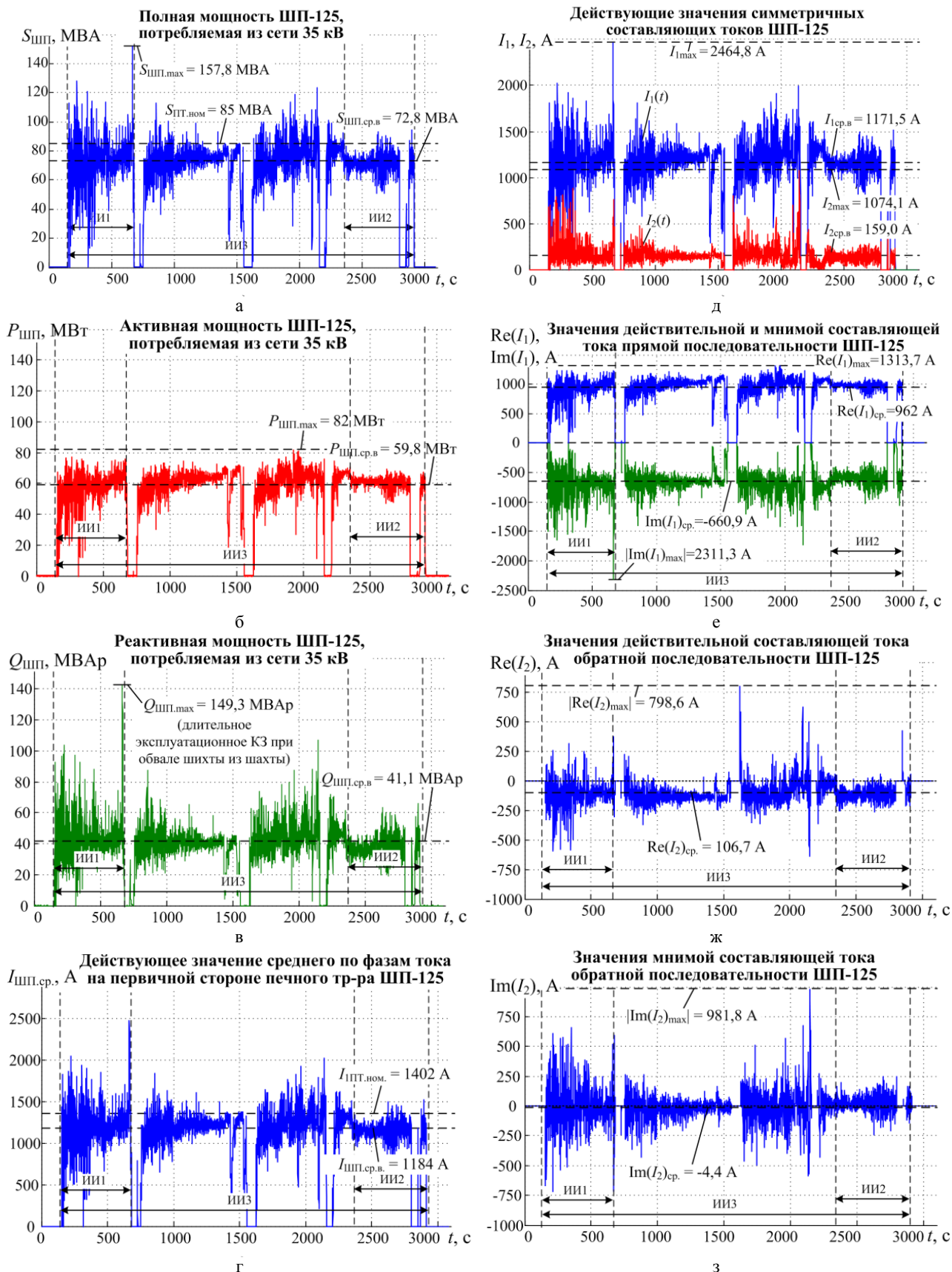


Рис. 3. Изменение составляющих полной мощности и симметричных составляющих тока ШП-125 за цикл плавки

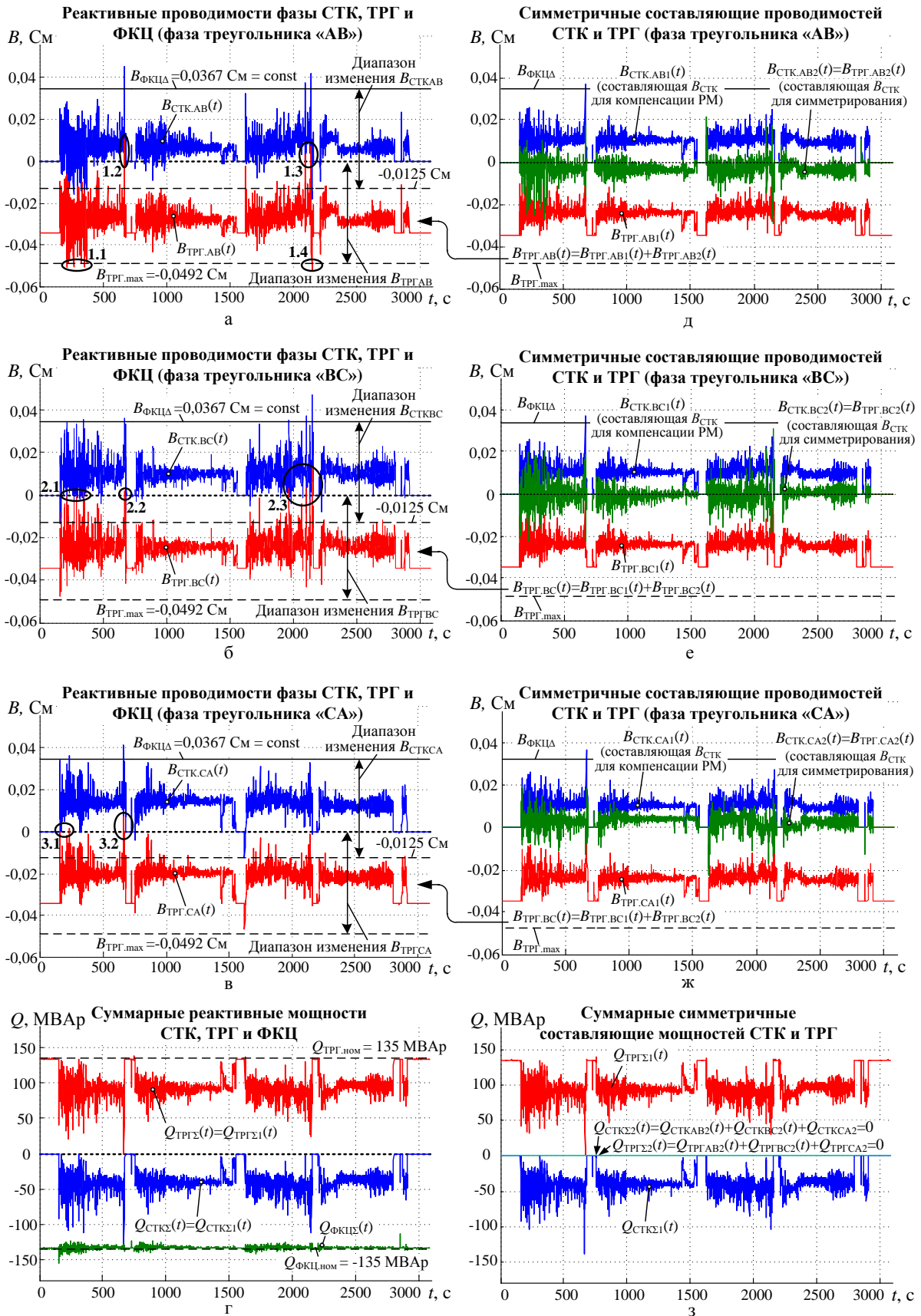


Рис. 4. Изменение реактивных проводимостей и мощностей основных элементов СТК ШП-125 за цикл плавки

3. Статистический анализ изменения составляющих токов прямой и обратной последовательностей ДСП различного класса и мощности

С целью выявления закономерностей изменения составляющих токов прямой и обратной последовательностей ДСП для графиков, представленных на рис. 3, е-з, было построено гистограммы, иллюстрирующие плотности и функции распределения вероятности параметров $Re(\dot{I}_1)$, $Im(\dot{I}_1)$, $Re(\dot{I}_2)$, $Im(\dot{I}_2)$ за цикл плавки ШП-125. Гистограммы приведены на рис. 5. Для шкалы функции рас-

пределения вероятности показаны интервалы значений токов с вероятностями $P_1 = 0,95$ и $P_2 = 0,9$. На гистограммах для $Re(\dot{I}_1)$ и $Im(\dot{I}_1)$ данные интервалы обозначены штриховыми линиями с указанием $F_1(x) = 0,95$ и $F_2(x) = 0,9$. Для параметров $Re(\dot{I}_2)$ и $Im(\dot{I}_2)$, принимающих как положительные, так отрицательные значения, данные интервалы определены разницей значений $P_1 = F_{11}(x) - F_{12}(x) = 0,975 - 0,025 = 0,95$ и $P_2 = F_{21}(x) - F_{22}(x) = 0,95 - 0,05 = 0,9$. Также на графиках указаны математические ожидания и стандартные отклонения составляющих токов.

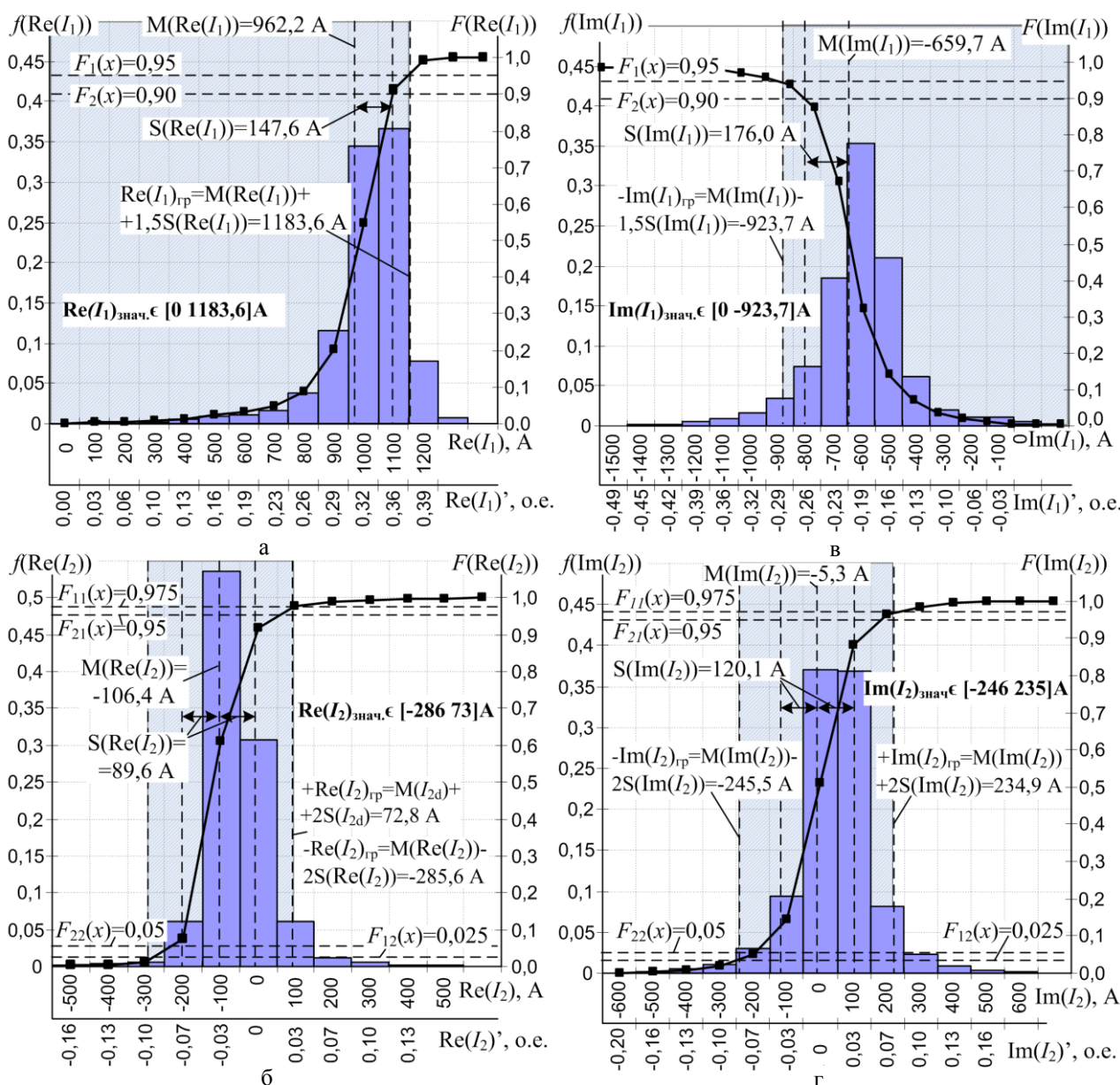


Рис. 5. Графики плотностей вероятности и интегральной функции распределения вероятности для составляющих токов прямой и обратной последовательностей исследуемой дуговой печи для цикла плавки (с исключением безтоковых пауз)

Необходимо отметить, что характер изменения токов ДСП подчиняется нормальному закону распределения только лишь на небольших стационарных интервалах, выбранных для фиксированных ступеней РПН печного трансформатора, индуктивности реактора, а также при неизменных уставках регулирования системы автоматического управления перемещением электродов [3]. Полученные распределения токов за цикл плавки (рис. 5) не проходят проверку на соответствие нормальному закону (при использовании критерия согласия Пирсона $\chi^2_{\text{факт}} > \chi^2_{\text{табл.}}$), что затрудняет применение функции Лапласа для получения аналитических выражений, с помощью которых возможно точное нахождение статистических характеристик составляющих прямой и обратной последовательностей токов за весь цикл плавки. Однако в данном случае представляется возможным нахождение определенных закономерностей при анализе функций распределения вероятностей.

Результаты анализа интегральных функций распределения вероятности, проведенные для 10 плавков ШП-125 АО «ССЗБ», а также для других электросталеплавильных комплексов, описание которых представлено ниже, показали определенную закономерность в характеристиках $F(x)$ для больших объемов выборок ($n = 15 \cdot 10^4 - 60 \cdot 10^4$ значений токов с дискретой 0,02 с) параметров $\text{Re}(\dot{I}_1)$, $\text{Im}(\dot{I}_1)$, $\text{Re}(\dot{I}_2)$, $\text{Im}(\dot{I}_2)$. В частности, было выявлено, что значимые интервалы значений $\text{Re}(\dot{I}_1)$ и $\text{Im}(\dot{I}_1)$ дуговой сталеплавильной печи могут быть определены следующим образом:

$$\text{Re}(\dot{I}_1)_{\text{знач.}} \in \left[0 \text{ M}(\text{Re}(\dot{I}_1)) + 1,5 \cdot S(\text{Re}(\dot{I}_1)) \right] \text{ при } P > 0,95; \quad (22)$$

$$\text{Re}(\dot{I}_1)_{\text{знач.}} \in \left[0 \text{ M}(\text{Re}(\dot{I}_1)) + 1,0 \cdot S(\text{Re}(\dot{I}_1)) \right] \text{ при } P > 0,90; \quad (23)$$

$$\text{Im}(\dot{I}_1)_{\text{знач.}} \in \left[\text{M}(\text{Im}(\dot{I}_1)) - 1,5 \cdot S(\text{Re}(\dot{I}_1)) \text{ } 0 \right] \text{ при } P > 0,95; \quad (24)$$

$$\text{Im}(\dot{I}_1)_{\text{знач.}} \in \left[\text{M}(\text{Im}(\dot{I}_1)) - 1,0 \cdot S(\text{Im}(\dot{I}_1)) \text{ } 0 \right] \text{ при } P > 0,90. \quad (25)$$

Для $\text{Re}(\dot{I}_1)$ и $\text{Im}(\dot{I}_1)$ выражения для интервалов значимых значений при тех же самых вероятностях имеют следующий вид:

$$\text{Re}(\dot{I}_2)_{\text{знач.}} \in \left[\text{M}(\text{Re}(\dot{I}_1)) - 2 \times \times S(\text{Re}(\dot{I}_1)) \text{ M}(\text{Re}(\dot{I}_1)) + 2 \cdot S(\text{Re}(\dot{I}_1)) \right] \text{ при } P > 0,95; \quad (26)$$

$$\text{Re}(\dot{I}_1)_{\text{знач.}} \in \left[\text{M}(\text{Re}(\dot{I}_1)) - 1,5 \times \times S(\text{Re}(\dot{I}_1)) \text{ M}(\text{Re}(\dot{I}_1)) + 1,5 \cdot S(\text{Re}(\dot{I}_1)) \right] \text{ при } P > 0,90; \quad (27)$$

$$\text{Im}(\dot{I}_1)_{\text{знач.}} \in \left[\text{M}(\text{Im}(\dot{I}_1)) - 2 \times \times S(\text{Re}(\dot{I}_1)) \text{ M}(\text{Im}(\dot{I}_1)) + 2 \cdot S(\text{Re}(\dot{I}_1)) \right] \text{ при } P > 0,95; \quad (28)$$

$$\text{Im}(\dot{I}_1)_{\text{знач.}} \in \left[\text{M}(\text{Im}(\dot{I}_1)) - 1,5 \times \times S(\text{Im}(\dot{I}_1)) \text{ M}(\text{Im}(\dot{I}_1)) + 1,5 \cdot S(\text{Im}(\dot{I}_1)) \right] \text{ при } P > 0,90. \quad (29)$$

Выражения (22)–(25) близки к определению границ интервалов в соответствии с правилом трех сигм, применяемым для нормального закона распределения. Разные коэффициенты при стандартном отклонении для прямой и обратной последовательности объясняются различными диапазонами изменения параметров $\text{Re}(\dot{I}_1)$, $\text{Im}(\dot{I}_1)$, $\text{Re}(\dot{I}_2)$, $\text{Im}(\dot{I}_2)$, а также разным характером интегральных функций распределения вероятностей.

В таблице приведены результаты статистического анализа изменения токов прямой и обратной последовательностей ДСП различного класса и мощности, в которых использованы различные технологии плавления металлошихты. Помимо мощной ШП-125 (85 МВА) АО «ССЗБ» также были проанализированы: 1) мощная ШП-120 (85 МВА) ЧерМК ПАО «Северсталь» (г. Череповец), в которой в процессе плавки используется добавление жидкого чугуна; 2) мощная ДСП-120 (90 МВА), установленная в ЭСПЦ-2 ПАО «АМЗ» (г. Аша), где применяется технология конвейерной подачи шихты в жидкую ванну (технология Consteel); 3) дуговая печь средней мощности ДСП-10 (10 МВА), функционирующая на сталелитейном заводе ООО «БВК» (г. Челябинск); 4) дуговая печь малой мощности ДСП-1,5 (1,25 МВА) ООО «СУМВЗ» (п. Староуткинск, Свердловская обл.). Подробные параметры этих комплексов указаны в [2, 3]. Токи и их стандартные отклонения приведены в относительных единицах. Базовыми величинами, как и в случае с ШП-125, являются максимальные значения трехфазных токов КЗ для наивысшей используемой ступени РПН печного трансформатора и заданной индуктивности реактора.

Результаты анализа изменения токов прямой и обратной последовательностей электросталеплавильных агрегатов различного класса и мощности

Электростале- плавильный агрегат	Период плавки	Информация о токах прямой и обратной последовательностей исследуемого электросталеплавильного агрегата															Требуемая мощность СТК, МВАр при $K_{СИМ} = 0,95$			Требуемая мощность СТК, МВАр при $K_{СИМ} = 0,90$			
		Прямая последовательность						Обратная последовательность															
		Действующее значение $I_{(1)}$, о.е.			Мнимая часть $Im(I_{(1)})$, о.е.			Действующее значение $I_{(2)}$, о.е.			Веществ. часть $Re(I_{(2)})$, о.е.			Мнимая часть $Im(I_{(2)})$, о.е.			Q_1	Q_2	$Q_Σ$	Q_1	Q_2	$Q_Σ$	
		$M(I)$	I_{max}	$S(I)$	$M(I)$	$ I_{max} $	$S(I)$	$M(I)$	$ I_{max} $	$S(I)$	$M(I)$	$ I_{max} $	$S(I)$	$M(I)$	$ I_{max} $	$S(I)$	$M(I)$	$ I_{max} $	$S(I)$	Q_1	Q_2	$Q_Σ$	Q_1
1. Шахтная печь ШП-125 (85 МВА). Работа на 100% ломе. $U_{ЛН} =$ 35 кВ, $I_H = 1402$ А. $I_{КЗФ.МАХ} = 3082$ А (при $U_L = 36,2$ кВ)	Стадия распл. шихты	0,38	0,81	0,09	-0,23	0,76	0,08	0,06	0,29	0,04	-0,04	0,19	0,03	-0,01	0,24	0,06	67	59	125	63	47	110	
	Работа дуг на жид- кую ванну	0,37	0,50	0,05	-0,20	0,35	0,04	0,04	0,14	0,02	-0,04	0,14	0,02	0,01	0,08	0,02	49	30	79	47	25	72	
	Весь цикл плавки	0,38	0,81	0,07	-0,22	0,76	0,06	0,05	0,36	0,03	-0,03	0,28	0,03	0,00	0,34	0,04	59	47	106	56	38	94	
2. Шахтная печь ШП-120 (85 МВА), работаю- щая в тандеме с УКП (25 МВА). Исп. жидкого чугуна. $U_{ЛН} = 35$ кВ, $I_{ндсп} = 1402$ А. $I_{нукп} = 1402$ А. $I_{КЗФ.МАХΣ} = 3617$ А (при $U_L = 35$ кВ)	Стадия распл. шихты	0,35	0,60	0,09	-0,22	0,57	0,08	0,06	0,34	0,04	-0,03	0,31	0,04	-0,02	0,29	0,05	75	70	145	71	56	127	
	Работа дуг на жид- кую ванну	0,36	0,54	0,05	-0,24	0,40	0,05	0,04	0,11	0,02	-0,01	0,08	0,03	-0,02	0,10	0,03	70	39	108	67	31	98	
	Весь цикл плавки	0,33	0,52	0,07	-0,21	0,39	0,06	0,07	0,27	0,04	-0,04	0,27	0,05	-0,03	0,21	0,03	67	72	139	64	59	123	
3. Дуговая стале- плавильная печь ДСП-120 (90 МВА). $U_{ЛН} = 35$ кВ, $I_H = 1485$ А. $I_{КЗФ.МАХ} = 3082$ А (при $U_L = 36,2$ кВ)	Плавка с традиц. технол. (весь цикл)	0,53	0,83	0,11	-0,40	0,79	0,10	0,06	0,37	0,05	0,01	0,37	0,06	0,02	0,33	0,06	88	50	137	84	37	121	
	Плавка с техноло- гией Consteel (весь цикл)	0,55	0,71	0,05	-0,37	0,57	0,04	0,03	0,30	0,02	0,00	0,19	0,02	0,02	0,23	0,02	70	21	91	68	17	85	
4. Дуговая стале- плавильная печь ДСП-10 (10 МВА). $U_{ЛН} = 10$ кВ, $I_H = 577,4$ А. $I_{КЗФ.МАХ} = 1347$ А (при $U_L = 10$ кВ)	Стадия распл. шихты	0,33	0,65	0,10	-0,23	0,58	0,09	0,08	0,30	0,05	-0,01	0,22	0,06	0,00	0,28	0,07	9	8	17	8	6	14	
	Работа дуг на жид- кую ванну	0,41	0,49	0,03	-0,26	0,38	0,03	0,02	0,12	0,02	0,00	0,11	0,02	0,00	0,10	0,02	7	2	10	7	2	9	
	Весь цикл плавки	0,36	0,69	0,08	-0,23	0,64	0,07	0,05	0,34	0,04	-0,01	0,27	0,04	0,00	0,33	0,05	8	6	13	7	4	12	
5. Дуговая стале- плавильная печь ДСП-1,5 (1,25 МВА). $U_{ЛН} = 6$ кВ, $I_H = 120,3$ А. $I_{КЗФ.МАХ} = 325$ А (при $U_L = 6,3$ кВ)	Стадия распл. шихты	0,44	0,95	0,15	-0,32	0,88	0,12	0,12	0,51	0,08	-0,01	0,37	0,09	-0,03	0,39	0,11	2	2	4	2	2	4	
	Работа дуг на жид- кую ванну	0,36	0,52	0,05	-0,17	0,30	0,03	0,06	0,25	0,03	-0,04	0,19	0,02	-0,02	0,25	0,03	1	1	2	1	1	2	
	Весь цикл плавки	0,44	0,95	0,09	-0,27	0,88	0,08	0,07	0,51	0,05	-0,04	0,37	0,05	-0,01	0,42	0,06	1	1	3	1	1	2	

Анализ статистических характеристик в **таблице** показал, что средние значения действительной $Re(\dot{I}_{(1)})$ и мнимой $Im(\dot{I}_{(1)})$ составляющих тока прямой последовательности остаются примерно-постоянными для всех анализируемых периодов, что объясняется выбором установок регулирования, обеспечивающих работу ДСП со значением номинального тока печного трансформатора в течение всего периода плавки. Стандартные отклонения $S(Re(\dot{I}_{(1)}))$ и $S(Im(\dot{I}_{(1)}))$ изменяются существенно: в 2–2,5 раза. Подобная ситуация также наблюдается для составляющих $Re(\dot{I}_{(2)})$ и $Im(\dot{I}_{(2)})$ тока обратной последовательности, где присутствует значительное отличие математических ожиданий и стандартных отклонений для начального периода и стадии доводки металла из-за снижения внешних возмущений и динамической несимметрии при горении дуг на жидкую ванну. Анализ стандартных отклонений, значимых для выбора СТК параметров $Im(\dot{I}_1)$, $Re(\dot{I}_2)$, $Im(\dot{I}_2)$ для начального периода плавки и всего цикла, показывает, что их соотношения находятся в интервале 1,3–2,7 раза, что говорит об их значительном влиянии на величину номинальной мощности СТК.

Необходимо отметить, что статистические показатели, приведенные в **таблице**, могут являться исходной информацией для выбора мощности СТК с использованием выражений (6)–(11) и (22)–(25). Описание методики выбора номинальной мощности компенсирующего устройства ДСП, где используются известные статистические характеристики составляющих токов прямой и обратной последовательностей, приведено ниже.

4. Разработка методики выбора мощности СТК на основе статистической информации о распределении симметричных составляющих токов ДСП за цикл плавки

С учетом выявленных диапазонов изменения составляющих прямой и обратной последовательностей токов дуговой печи, охватывающих 95% ($K_{сим} = 95\%$) всех рабочих точек за цикл плавки, можно записать выражения для определения требуемых реактивных проводимостей фаз эквивалентного треугольника СТК:

$$B_{СТКАВ.треб.} = -\frac{\sqrt{3}}{3U_{AB.CP}} \times \left[\left(M(Im(\dot{I}_1)) - 1,5S(Im(\dot{I}_1)) \right) - \sqrt{3} \left(M(Re(\dot{I}_2)) \pm 2S(Re(\dot{I}_2)) \right) + \left(M(Im(\dot{I}_2)) \pm 2S(Im(\dot{I}_2)) \right) \right]; \quad (30)$$

$$B_{СТКВС.треб.} = -\frac{\sqrt{3}}{3U_{BC.CP}} \times \left[\left(M(Im(\dot{I}_1)) - 1,5S(Im(\dot{I}_1)) \right) - 2 \left(M(Im(\dot{I}_2)) \pm 2S(Im(\dot{I}_2)) \right) \right]; \quad (31)$$

$$B_{СТКА.треб.} = -\frac{\sqrt{3}}{3U_{CA.CP}} \times \left[\left(M(Im(\dot{I}_1)) - 1,5S(Im(\dot{I}_1)) \right) + \sqrt{3} \left(M(Re(\dot{I}_2)) \pm 2S(Re(\dot{I}_2)) \right) + \left(M(Im(\dot{I}_2)) \pm 2S(Im(\dot{I}_2)) \right) \right], \quad (32)$$

где $U_{AB.CP}$, $U_{BC.CP}$, $U_{CA.CP}$ – средние за цикл плавки действующие значения напряжений в точке подключения комплекса «ДСП-СТК» (при выборе мощности СТК могут быть приняты номинальному или согласованному уровню линейного напряжения $U_{л.ном.}$).

Максимальное значение требуемой реактивной проводимости фазы эквивалентного треугольника СТК находится как максимальная величина из трех значений $B_{СТКАВ.треб.}$, $B_{СТКВС.треб.}$, $B_{СТКА.треб.}$ с учетом влияния значений $\pm S(Re(\dot{I}_2))$ и $\pm S(Im(\dot{I}_2))$:

$$B_{СТК.мах} = \max(B_{СТКАВ.треб.}, B_{СТКВС.треб.}, B_{СТКА.треб.}). \quad (33)$$

Данное значение $B_{СТК.мах}$ определяет величину реактивной проводимости фазы эквивалентного треугольника ФКЦ и, соответственно, номинальную мощность фильтрокомпенсирующей цепи СТК:

$$B_{ФКЦ.ном} = B_{СТК.мах}; \quad Q_{ФКЦ.ном} = -3U_{л.ном.}^2 \cdot B_{ФКЦ.ном}, \quad (34)$$

где $B_{ФКЦ.ном}$ – реактивная проводимость фазы эквивалентного треугольника ФКЦ (в действительности фильтры высших гармоник в составе ФКЦ имеют соединение в звезду; в этом случае проводимость фазы эквивалентной звезды ФКЦ можно определить как $B_{ФКЦУ.ном} = 3B_{ФКЦ.ном}$).

Для исследуемой электродуговой установки расчетное значение номинальной реактивной мощности ФКЦ СТК с учетом согласованного уровня напряжения на секции ЗРУ-35 кВ $U_{л} = 36,2$ кВ равно $Q_{ФКЦ.ном} = -106$ МВАр (см. **таблицу**).

Номинальная мощность ТРГ с точки зрения обеспечения функции симметрирования СТК может быть определена на основании рассчитанной минимальной величины $B_{СТК.мин}$ и рассчитанном ранее значении $B_{ФКЦ.ном}$:

$$V_{\text{СТК.min}} = \min(V_{\text{СТК.АВ.треб.}}, V_{\text{СТК.ВС.треб.}}, V_{\text{СТК.СА.треб.}}), \quad (35)$$

$$Q_{\text{ТРГ.ном}} = Q_{\text{СТК.min}} - Q_{\text{ФКЦ.ном}} = 3U_{\text{л.ном}}^2 (V_{\text{СТК.min}} - V_{\text{ФКЦ.ном}}). \quad (36)$$

Для исследуемой ШП-125 значение $V_{\text{СТК.min}}$, определенное на основании рассчитанных статистических характеристик, является положительным ($V_{\text{СТК.min}} = 0,0031 \text{ См}$). В этом случае в соответствии с выражением (35) мощность ТРГ при согласованном напряжении $U_{\text{л}} = 36,2 \text{ кВ}$ будет составлять $Q_{\text{ТРГ.ном}} = 93,4 \text{ МВАр}$, что меньше $Q_{\text{ФКЦ.ном}}$. Однако на практике для обеспечения нулевой реактивной мощности комплекса «ДСП-СТК» во всех режимах работы электродуговой установки, включая технологические паузы, номинальная мощность ТРГ должна находиться в соотношении

$$Q_{\text{ТРГ.ном}} \geq |Q_{\text{ФКЦ.ном}}|, \quad (37)$$

т.е. в случае ШП-125 $Q_{\text{ТРГ.ном}} = 106 \text{ МВАр}$.

Необходимо отметить, что максимальная реактивная мощность ТРГ $Q_{\text{ТРГ.max}}$, определяющая величину индуктивности реактора, выбирается в 1,1–1,25 раза больше номинальной мощности $Q_{\text{ФКЦ.ном}}$. Это обусловлено несколькими причинами: 1) необходимость обеспечения работы ТРГ в регулируемом диапазоне при повышенном напряжении в точке подключения комплекса «ДСП-СТК» (обычно до $U_{\text{л}} = 1,1U_{\text{л.ном}}$); 2) возможность обеспечения дополнительных функций по снижению бросков тока при включении печного трансформатора ДСП, а также снижение коммутационных перенапряжений при последовательном включении фильтров высших гармоник, за счет кратковременного перевода СТК в режим потребления реактивной мощности [2, 20]; 3) работа ТРГ с оптимальными углами регулирования, при которых обеспечивается минимизация высших гармоник в линейных токах тиристорно-реакторной группы. Исходя из вышесказанного для исследуемой электродуговой установки мощность $Q_{\text{ТРГ.max}}$ может составлять $Q_{\text{ТРГ.max}} = 1,25 Q_{\text{ФКЦ.ном}} = 1,25 \cdot 106 = 132,5 \text{ МВАр}$.

Обычно работа ТРГ со значениями $Q_{\text{ТРГ}}$, близкими к $Q_{\text{ТРГ.max}}$, возможна только в течение непродолжительных периодов времени (не более нескольких секунд), что обусловлено ограничениями системы водяного охлаждения тиристорных ключей и параметрами тепловой защиты.

Важным моментом при использовании разработанной методики выбора номинальной мощности элементов СТК является учет парал-

лельной работы других электросталеплавильных агрегатов. Например, в другом исследуемом комплексе ЧерМК ПАО «Северсталь» параллельно ШП-120 функционирует установка ковшепечь (УКП) с мощностью печного трансформатора 25 МВА. В данном случае при выборе мощности СТК необходимо анализировать симметричные составляющие суммарных токов ШП-120 и УКП, что было сделано в **таблице**. В данном случае номинальная мощность СТК в соответствии с данной методикой при $K_{\text{сим}} = 95\%$ должна составлять $Q_{\text{СТК.ном}} = 139 \text{ МВАр}$.

Необходимо отметить, что оба мощных электросталеплавильных комплекса с шахтными печами (АО «ССЗБ» и ЧерМК ПАО «Северсталь») имеют независимое питание от понизительной подстанции с высоким уровнем первичного напряжения 220 кВ, при этом на стороне 35 кВ отсутствуют другие электроприемники, кроме ШП и УКП. Здесь без значительных ухудшений электрических и технологических режимов работы дуговой печи, а также без ухудшения ПКЭ на стороне 220 кВ, мощность СТК может быть выбрана при условии $K_{\text{сим}} = 90\%$. В этом случае в соответствии с **таблицей** для ШП-125 АО «ССЗБ» мощность СТК будет равна $Q_{\text{СТК.ном}} = 94 \text{ МВАр}$, а для электросталеплавильного комплекса ЧерМК ПАО «Северсталь» $Q_{\text{СТК.ном}} = 123 \text{ МВАр}$.

Для электросталеплавильного комплекса на базе ДСП-120 (90 МВА) мощность СТК при использовании технологии Consteel при $K_{\text{сим}} = 95\%$ составляет $Q_{\text{СТК.ном}} = 91 \text{ МВАр}$, а при $K_{\text{сим}} = 90\%$ – $Q_{\text{СТК.ном}} = 85 \text{ МВАр}$, что на 9 и 15% ниже фактической установленной мощности СТК 100 МВАр фирмы АВВ. Использование традиционной технологии расплавления металлошихты значительно повышает мощность компенсирующего устройства из-за увеличения колебаний токов дуг: $Q_{\text{СТК.ном}} = 137 \text{ МВАр}$ ($K_{\text{сим}} = 95\%$) и $Q_{\text{СТК.ном}} = 123 \text{ МВАр}$ ($K_{\text{сим}} = 90\%$).

С уменьшением мощности ДСП увеличиваются кратности токов эксплуатационных коротких замыканий из-за меньших значений индуктивных сопротивлений электрического контура. Это приводит к увеличению отношения $Q_{\text{СТК.ном}}/S_{\text{ПТ}}$ до 1,3–1,5, что можно видеть из результатов расчетов для ДСП-10 (10 МВА) ООО «БВК» и ДСП-1,5 (1,25 МВА) ООО «СУМВЗ» (см. **таблицу**).

Анализ полученных результатов позволяет сделать дополнительный вывод о том, что значительное влияние на статистические характеристики симметричных составляющих токов и, соответственно, номинальную мощность СТК, помимо конструкции ДСП и применяемой технологии подачи шихтового материала, оказывает тип и каче-

ство настройки системы автоматического управления электрическими режимами ДСП, а также оптимальность выбора профиля плавки, определяющего использование ступеней РПН печного трансформатора, реактора и рабочей кривой. Неверно выбранный электрический режим ДСП в совокупности с неоптимальной настройкой нелинейных регуляторов параметра электрического контура ДСП (например, регуляторов импеданса), может привести к повышению колебаний токов и увеличению количества крайних несимметричных режимов в период начального расплавления металлошихты, что является причиной увеличения требуемых реактивных проводимостей фаз СТК и повышения мощности компенсирующего устройства. Данное обстоятельство требует применения комплексного подхода к выбору режимов работы дуговой печи и компенсирующего устройства, учитывающего динамические показатели системы управления перемещением электродов ДСП и используемые профили плавки. Также значительное влияние на режимы работы комплекса «ДСП-СТК» оказывает уровень напряжения в точке подключения печного трансформатора и ДСП, определяемый ступенью РПН сетевого трансформатора понизительной подстанции. При использовании неоптимальных уровней напряжения может произойти ухудшение энергетических показателей комплекса «ДСП-СТК» и симметрирующей способности СТК. Решению данной проблемы посвящены исследования [2, 21, 22].

Также следует отметить, что в описанной методике, основанной на анализе несимметричных режимов ДСП основным критерием выбора мощности является обеспечение работы СТК в регулировочном диапазоне без выхода ТРГ в ограничение по углу управления тиристорными ключами. Однако сама необходимость использования СТК на стадии проектирования системы электроснабжения электросталеплавильного комплекса должна проверяться на основании анализа ПКЭ с использованием математических моделей комплекса «ДСП-СТК», в которых реализованы алгоритмы управления гидроприводами перемещения электродов и учтены случайные колебания токов и мощности ДСП [2, 23]. Так, например, в системе электроснабжения рассматриваемой ДСП-10 (10 МВА) ООО «БВК» используется обычное фильтрокомпенсирующее устройство ФКУ 6,3 МВАр, которого достаточно для поддержания заданных ПКЭ и обеспечения заданного коэффициента реактивной мощности $\text{tg}\varphi$ на границе балансовой принадлежности предприятия и энергоснабжающей организации [24].

В случае если экспериментальный или расчет-

ный анализ ПКЭ, а также электрических и технологических характеристик ДСП показывает необходимость использования СТК, предложенная методика позволит с высокой точностью определить номинальную мощность статического компенсатора с учетом эксплуатационных несимметричных режимов. При этом полученные значения стандартных отклонений составляющих прямой и обратной последовательностей токов для ДСП различного класса и мощности, представленные в **таблице** могут являться исходной информацией для выбора параметров СТК других аналогичных электросталеплавильных комплексов.

Выводы

1. В настоящее время статический тиристорный компенсатор, включающий в себя ТРГ и ФКЦ на базе фильтров высших гармоник, является основным типом устройств компенсации реактивной мощности для электросталеплавильных комплексов на базе ДСП и УКП. Несмотря на существование компенсирующих устройств нового поколения типа СТАКОМ, СТК обладают достаточным быстродействием и функциональными возможностями для обеспечения оптимального функционирования электродуговых печей и поддержания заданных показателей качества электроэнергии.

2. Правильный выбор номинальной мощности СТК для систем электроснабжения электросталеплавильных комплексов играет важную роль в достижении оптимальных электрических режимов электросталеплавильных агрегатов, обеспечении заданных показателей качества электроэнергии в точке общего присоединения электроприемников, поддержании заданного коэффициента реактивной мощности на границе балансовой принадлежности электрических сетей предприятия, а также снижении стоимости и минимизации эксплуатационных затрат компенсирующего устройства.

3. Существующие методики выбора мощности и расчета параметров СТК не учитывают влияние эксплуатационных несимметричных режимов ДСП, что приводит в ряде случаев к завышению установленной мощности компенсатора и, как следствие, росту его стоимости и повышению эксплуатационных затрат из-за увеличенных потерь активной мощности в элементах СТК.

4. На основе экспериментальных данных, полученных на действующих электросталеплавильных комплексах, был проведен комплексный анализ несимметричных режимов ДСП различного класса, с помощью которого было показано влияние степени несимметрии токов на требуемую мощность СТК. Исследования показали, что вели-

чина требуемой реактивной проводимости и мощности СТК для компенсации тока обратной последовательности ДСП может достигать 100% от аналогичных составляющих, необходимых для компенсации реактивной составляющей тока прямой последовательности, что свидетельствует о необходимости правильного учета несимметричных режимов при выборе мощности СТК.

5. На основании статистической обработки экспериментальных данных для ДСП различного класса и мощности были выявлены закономерности в распределении составляющих токов прямой и обратной последовательностей, с помощью которых получены аналитические выражения для определения интервалов значимых значений токов при коэффициентах симметрирования $K_{\text{сим}} = 90$ и 95% . Данные результаты легли в основу усовершенствованной методики выбора мощности СТК для систем электроснабжения электросталеплавильных комплексов. Применение методики позволяет осуществить обоснованный выбор номинальной мощности СТК с учетом фактических несимметричных режимов ДСП без завышения мощности компенсатора. Результаты расчетов для электросталеплавильных комплексов с установленными СТК показали, что мощности функционирующих компенсирующих устройств могли быть снижены на стадии проектирования на 10–30%, что привело бы к соответствующему снижению их стоимости и эксплуатационных затрат.

6. Исследования показали, что настройка электрического режима ДСП, а также динамические показатели систем управления перемещением электродов электродуговых печей могут оказать значительное влияние на выбор установленной мощности СТК. При некорректной настройке электрических и технологических режимов работы ДСП мощность СТК может быть определена неверно и являться завышенной, что свидетельствует о необходимости использования комплексного подхода к оптимизации режимов ДСП и СТК.

Список литературы

1. Николаев А.А., Корнилов Г.П., Якимов И.А. Исследование режимов работы дуговых сталеплавильных печей в комплексе со статическими тиристорными компенсаторами реактивной мощности. Часть 1 // *Электromеталлургия*. 2014. №5. С. 15–22.
2. Николаев А.А. Повышение эффективности работы электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статический тиристорный компенсатор»: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. 318 с.
3. Николаев А.А. Повышение эффективности работы дуговых сталеплавильных печей и установок ковшепечь за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 161 с.
4. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / Николаев А.А., Руссо Ж.Ж., Сцымански В., Тулупов П.Г. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2016. Т. 14. №3. С. 106–120. doi: 10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120
5. Hingorani N. G., Gyugyi L. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems // IEEE Press book. 2000. 429 p.
6. Kashani M.G., Babaei S., Bhattacharya S. SVC and STATCOM Application in Electric Arc Furnace Efficiency Improvement // *Proceedings of the 4th IEEE International Symposium "Power Electronics for Distributed Generation Systems" (PEDG)*. Rogers, AR, USA, 2013, pp. 1–7. doi: 10.1109/PEDG.2013.6785641.
7. Morello S., Dionise T.J., Mank T.L. Installation, Startup and Performance of a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace Upgrade // *Proceedings of the Industry Applications Society Annual Meeting*. Addison, TX, USA. IEEE, 2015, pp. 1–9. doi: 10.1109/IAS.2015.7356881
8. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: НЦ ЭНАС, 2002. 247 с.
9. Reduction of SVC Capacity by Flicker Control Using Parallel Band-Pass Filters / Gibo N., Yukihira K., Deno K., Nagasaka Y. // *Proceedings of the 14th International Conference "Harmonics and Quality of Power" (ICHQP)*. Bergamo. Italy, 2010, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICHQP.2010.5625333
10. Gildong K., Lee H. Optimal Capacity of SVC to Compensate Flicker induced by Electric Arc Furnace // *Proceedings of the International Conference "Information and Multimedia Technology"*. Jeju Island, South Korea, 2009, pp. 43–46. doi: 10.1109/ICIMT.2009.36
11. Reactive Compensation for AC Electric Arc Furnace Considering Power Quality Constraints / Zhu X.H., Chen H.K., Hu P., Chen R.N. // *Proceedings of the 17th International Conference "Harmonics and Quality of Power" (ICHQP)*. Belo Horizonte. Brazil, 2016, pp. 919–924. doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783453.
12. Фомин А.В. Анализ методик обоснования мощности статического тиристорного компенсатора для сталеплавильных печей // *Известия Тульского государственного технического университета. Технические науки*. 2010. Вып. 4. Ч.2. С.35–46.
13. Тропин В.В. Анализ и синтез быстродействующих систем компенсации реактивной мощности в электрических сетях с резкопеременными нагрузками методом частотных характеристик: дис. ... д-ра техн. наук. Краснодар, 1998. 523 с.
14. Фомин А.В. Обоснование рациональных параметров устройств поперечной компенсации электротехнических систем электротехнологий: дис. ... канд. техн. наук. Тула, 2009. 161 с.
15. Фрозинова Т.Ю. Повышение эффективности функциони-

- рования устройств поперечной компенсации электротехнических систем электротехнологий: дис. ... канд. техн. наук. Тула, 2013. 134 с.
16. Nikolaev A.A., Anokhin V.V., Lozhkin I.A. Estimation of accuracy of chosen SVC power for steel-making arc furnace // Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016), Chelyabinsk. Russia. IEEE. 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911442
 17. Xu S., Zhao J.F., Tang G.Q. A New SVC Control Strategy for Voltage Flicker Mitigation and Integrated Compensation to Electric Arc Furnace // Proceedings of the Third International Conference “Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies”. Nanjing. China. 2008, pp. 1972–1976. doi: 10.1109/DRPT.2008.4523730
 18. Samet H., Pamiani M. Predictive Method for Improving SVC Speed in Electric Arc Furnace Compensation // IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, issue. 1, 2007, pp. 732–734. doi: 10.1109/TPWRD.2006.886768
 19. Cernan M., Tlustý J. Study of the Susceptance Control of Industrial Static Var Compensator // Proceedings of the 16th International Scientific Conference of Electric Power Engineering. Kouty nad Desnou, Czech Republic. 2015, pp. 1–4. doi: 10.1109/EPE.2015.7161150
 20. Application of Static Var Compensator of Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Voltage Drops Compensation in Factory power Supply System of Metallurgical Enterprise / Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Akay I., Gok Y. // Proceedings of the Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Calgary. Canada. IEEE. 2014, pp. 235–41. doi: 10.1109/EPEC.2014.18
 21. Abdel-Rahman M.H., Youssef F.M., Saber A.A. New Static Var Compensator Control Strategy and Coordination with Under-Load Tap Changer // IEEE Transaction on Power Delivery. 2006, vol. 21, no. 3, pp. 1630–1635. doi: 10.1109/TPWRD.2005.858814
 22. Coordination of an SVC with a ULTC Reserving Compensation Margin for Emergency Control / Son K.M., Moon K.S., Lee S.K., Park J.K. // IEEE Transaction on Power Delivery. 2000, vol. 15, no. 4, pp. 1193–1198. doi: 10.1109/61.891502
 23. Выбор мощности статических тиристорных компенсаторов для сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Николаев А.А., Полозюк П.Ю., Пелагеин Т.Е., Корнилов Г.П. // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 19. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. С. 80–84.
 24. Обоснование выбора мощности фильтрокомпенсирующего устройства дуговой сталеплавильной печи / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Зайцев А.С., Скакун С.В., Урманова Ф.Ф. // Главный энергетик. 2015. № 8. С. 49–56.

Поступила 21.08.17.

Принята в печать 15.09.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-74-94>

DEVELOPMENT OF AN IMPROVED METHOD FOR SELECTING THE POWER OF A STATIC VAR COMPENSATOR FOR ELECTRIC ARC FURNACES

Aleksandr A. Nikolaev – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID: orcid.org/0000-0001-5014-4852

Abstract

Relevance. Static var compensators are critical elements of the power supply systems designed for high-power electric steel-making complexes comprising electric arc furnaces and ladle furnaces. Static var compensators help maintain the primary voltage of furnace transformers, due to which the design capacity of steel-making furnaces can be reached. They also ensure the specified power quality is reached in the point of common coupling of arc furnaces and other electrical loads. At present, one does not find, either in Russian or foreign literature, any guidelines on how to select the static var compensator components by rated power while accounting for asymmetric operation of different classes of electric arc furnaces. The existing techniques utilized by major manufacturers of compensators for electric arc furnaces in some cases can result in overrated power for the filtering and compensation circuit and the thyristor controlled reactors, which leads to increased price and operating costs due to high active power losses in the compensator elements. In this regard, it appears to be an important task to come up with

a different approach to selecting the static var compensator by rated power based on the analysis of how the sequence components of the electric arc furnace currents tend to change at different process stages. **Objectives:** The objective is to come up with a better technique for deciding on the power of the static var compensator elements using experimental data characterising the change of the sequence components of currents, which would ensure accuracy of calculated compensator parameters without overestimating the unit's rated power. **Methods Applied:** Arrays of instantaneous values of currents and voltages of electric arc furnaces of various power ratings and classes were used as the basic initial data for theoretical studies; the MATLAB software with the Simulink application was utilized for data processing; the above mentioned environment was used to analyse the real and imaginative parts of both positive and negative sequence currents of electric arc furnaces with the help of the symmetrical component method; some methods from the theory of probability and mathematical statistics were used to determine significant variation ranges of the fur-

nance electrical parameters. **Originality:** The results of this research can be described as novel as this research provides the first-of-its-kind comprehensive analysis of asymmetric operation of electric arc furnaces of different classes; based on these studies, a new technique was developed for selecting the static var compensator by rated power, which, compared with other existing techniques, ensures high accuracy of calculated compensator parameters. **Findings:** Regularities have been established for varying sequence components of electric arc furnace currents; the authors demonstrate how the asymmetric operation can impact the target values of susceptances and total reactive power of the electric arc furnace compensator; statistical data have been obtained on the distribution of sequence components of currents for electric arc furnaces of different classes and power ratings; a new technique has been developed for selecting the power of the static var compensator for an electric arc furnace. **Practical Relevance:** The results obtained are of great theoretical relevance for electrical engineering of arc furnaces and can be useful for calculating the parameters of static var compensators operated as part of the power supply systems of steel-making complexes.

Keywords: Electric arc furnace, ladle furnace, static var compensator, reactive power compensation, electric power quality, asymmetrical arcing, high-order harmonic filtering, selecting the power of the static var compensator.

References

1. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Yakimov I.A. *Issledovanie rezhimov raboty dugovyh staleplavil'nyh pechej v komplekse so staticheskimi tiristornymi kompensatorami reaktivnoj moshchnosti. Chast' 1.* [Study of operating modes of electric arc furnaces together with static var compensators. Part 1]. Elektrometallurgiya [Electrometallurgy], 2014, no. 5, pp. 15–22. (In Russ.)
2. Nikolaev A.A. *Povyshenie effektivnosti raboty elektrotehnicheskogo kompleksa «dugovaja staleplavil'naja pech' – staticheskij tiristornyj kompensator»: monografiya* [Enhancing the performance of the electric arc furnace – static var compensator complex: monograph]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2017, 318 p. (In Russ.)
3. Nikolaev A.A. *Povyshenie effektivnosti raboty dugovyh staleplavil'nyh pechej i ustanovok kovsh-pech' za schet primeneniya usovershenstvovannyh algoritmov upravleniya ehlektricheskimi rezhimami: monografiya* [Enhancing the performance of electric arc furnaces and ladle furnaces through the application of optimised electrical control algorithms: monograph]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2015, 161 p. (In Russ.)
4. Nikolaev A.A., Rousseau J.J., Szymansky V., Tulupov P.G. *Eksperimental'noe issledovanie garmonicheskogo sostava tokov dug dlja dugovyh staleplavil'nyh pechej razlichnoj moshnosti* [An experimental study of electric arc current harmonics for electric arc furnaces with different power characteristics]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, no. 3, pp. 106–120. (In Russ.)
5. Hingorani N. G., Gyugyi L. *Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems.* IEEE Press book. 2000. 429 p.
6. Kashani M.G., Babaei S., Bhattacharya S. *SVC and STATCOM Application in Electric Arc Furnace Efficiency Improvement. Proceedings of the 4th IEEE International Symposium "Power Electronics for Distributed Generation Systems" (PEDG).* Rogers, AR, USA. 2013, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/PEDG.2013.6785641>.
7. Morello S., Dionise T.J., Mank T.L. *Installation, Startup and Performance of a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace Upgrade. Proceedings of the Industry Applications Society Annual Meeting.* Addison, TX, USA. IEEE. 2015, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1109/IAS.2015.7356881>.
8. Kochkin V.I., Nechaev O.P. *Primenenie staticheskikh kompensatorov reaktivnoj moshchnosti v jelektricheskikh setjah jenergosistem i predpriyatij* [Implementation of static var compensators in electrical grids of electrical power systems and industrial enterprises]. Moscow: ENAS Innovation Centre, 2002, 247 p. (In Russ.)
9. *Reduction of SVC Capacity by Flicker Control Using Parallel Band-Pass Filters.* Gibo N., Yukihira K., Deno K., Nagasaka Y. *Proceedings of the 14th International Conference "Harmonics and Quality of Power" (ICHQP).* Bergamo. Italy. 2010, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625333>.
10. Gildong K., Lee H. *Optimal Capacity of SVC to Compensate Flicker induced by Electric Arc Furnace. Proceedings of the International Conference "Information and Multimedia Technology".* Jeju Island, South Korea. 2009, pp. 43–46. doi: 10.1109/ICIMT.2009.36.
11. *Reactive Compensation for AC Electric Arc Furnace Considering Power Quality Constraints.* Zhu X.H., Chen H.K., Hu P., Chen R.N. *Proceedings of the 17th International Conference "Harmonics and Quality of Power" (ICHQP).* Belo Horizonte. Brazil. 2016, pp. 919–924. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2016.7783453>.
12. Fomin A.V. *Analysing the methods of justifying the power of static var compensators for electric arc furnaces. Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tehnicheskie nauki* [Bulletin of the Tula State University. Engineering Sciences], 2010, iss. 4, part 2, pp. 35–46.
13. Tropin V.V. *Analiz i sintez bystrodejstvujushih sistem kompensacii reaktivnoj moshchnosti v jelektricheskikh setjah s rezkoperemennymi nagruzkami metodom chastotnyh harakteristik. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Analysis and synthesis of fast-acting reactive power compensation systems with the help of frequency-response method. Doctoral dissertation]. Krasnodar, 1998, 523 p.
14. Fomin A.V. *Obosnovanie racional'nyh parametrov ustrojstv poperechnoj kompensacii jelektricheskikh sistem jelektricheskogo ustrojstva. Diss. kand. tekhn. nauk* [Justification of the rational parameters of shunt compensating devices for electrical systems. Ph.D. dissertation]. Tula, 2009, 161 p.
15. Frozinova T.Yu. *Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija ustrojstv poperechnoj kompensacii jelektricheskikh sistem jelektricheskogo ustrojstva. Diss. kand. tekhn. nauk* [Enhancing the performance of shunt compensating devices of electrical

- systems. Ph.D. dissertation]. Tula, 2013, 134 p.
16. Nikolaev A.A., Anokhin V.V., Lozhkin I.A. Estimation of accuracy of chosen SVC power for steel-making arc furnace. Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016), Chelyabinsk. Russia. IEEE. 2016, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911442>.
 17. Xu S., Zhao J.F., Tang G.Q. A New SVC Control Strategy for Voltage Flicker Mitigation and Integrated Compensation to Electric Arc Furnace. Proceedings of the Third International Conference “Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies”. Nanjing. China. 2008, pp. 1972–1976. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2008.4523730>.
 18. Samet H., Pamiani M. Predictive Method for Improving SVC Speed in Electric Arc Furnace Compensation. IEEE Transactions on Power Delivery. 2007, vol. 22, iss. 1, pp. 732–734. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.886768>.
 19. Cernan M., Tlustý J. Study of the Susceptance Control of Industrial Static Var Compensator. Proceedings of the 16th International Scientific Conference of Electric Power Engineering. Kouty nad Desnou, Czech Republic. 2015, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/EPE.2015.7161150>.
 20. Nikolaev A.A., Komilov G.P., Khramshin T.R., Akay I., Gok Y. Application of Static Var Compensator of Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Voltage Drops Compensation in Factory power Supply System of Metallurgical Enterprise. Proceedings of the Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Calgary. Canada. IEEE. 2014, pp. 235–41. <https://doi.org/10.1109/EPEC.2014.18>.
 21. Abdel-Rahman M.H., Youssef F.M., Saber A.A. New Static Var Compensator Control Strategy and Coordination with Under-Load Tap Changer. IEEE Transaction on Power Delivery. 2006, vol. 21, no. 3, pp. 1630–1635. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.858814>.
 22. Son K.M., Moon K.S., Lee S.K., Park J.K. Coordination of an SVC with a ULTC Reserving Compensation Margin for Emergency Control. IEEE Transaction on Power Delivery. 2000, vol. 15, no. 4, pp. 1193–1198. doi: 10.1109/61.891502.
 23. Nikolaev A.A., Polozyuk P.Yu., Pelagein T.E., Komilov G.P. *Vybor moshchnosti staticheskikh tiristornykh kompensatorov dlya sverkhmoshchnykh dugovykh staleplavilnykh pechey [Deciding on the power of static var compensators for ultra high-power electric arc furnaces]. Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы: Mezhdunarodnyy sb. nauch. tr. [Electrical Systems and Complexes: University proceedings]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, vol. 19, pp. 80–84.*
 24. Nikolaev A.A., Komilov G.P., Zaytsev A.S., Skakun S.V., Urmanova F.F. *Obosnovanie vybora moshchnosti fil'tro-kompensirujushhego ustrojstva dugovoj staleplavil'noj pechi [Justifying the choice of power for the filtering and compensation device utilized in an electric arc furnace]. Glavnyj energetik [Electrical supervisor], 2015, no. 8, pp. 49–56. (In Russ.)*

Received 21/08/17
Accepted 15/09/17

Образец для цитирования

Николаев А.А. Разработка усовершенствованной методики выбора мощности статического тиристорного компенсатора дуговой сталеплавильной печи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 74–94. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-74-94>

For citation

Nikolaev A.A. Development of an improved method for selecting the power of a static var compensator for electric arc furnaces. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 74–94. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-74-94>

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

УДК 669.041+658.264:621.365

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-95-101>

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА С ПОМОЩЬЮ ЛАБОРАТОРНЫХ УСТАНОВОК РЕКУПЕРАТИВНОГО ТИПА

Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Герасименко Н.П.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

Аннотация

Постановка задачи: в статье приведена лабораторная установка, разработанная на кафедре теории и автоматизации металлургических процессов и печей ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ), и описан принцип её работы, а также методика проведения исследования. **Цель работы:** совершенствование лабораторного оборудования для обеспечения наглядного представления о процессах теплообмена. Новизна: данная установка даёт возможность получить значительное количество теплофизических параметров, необходимых для исследования и моделирования процесса теплообмена по сравнению с существующими аналогами. **Результат:** разработанная установка позволяет проводить исследование процессов теплообмена вычислительным экспериментом с помощью математической модели, основанной на зональном методе. Конструкцией установки предусмотрена возможность быстрого переоборудования её из прямого режима работы в противоточный режим. Она оснащена системой автоматического контроля и регулирования. **Практическая значимость:** установка позволяет получить наглядное представление о теплопередаче, тепловых потоках, закономерностях, имеющих место при теплообмене, и является практическим учебным пособием при подготовке кадров высшей квалификации.

Ключевые слова: математическое моделирование, исследование теплообмена, лабораторные установки, рекуператоры.

Введение

Теплообменные процессы играют важную роль во многих энергетических устройствах и технологической аппаратуре. Металлургия, теплоэнергетика, химические, пищевые и криогенные технологии – лишь некоторые области, использующие теплообменные аппараты. В большинстве теплообменных аппаратов, применяемых во всех этих отраслях, теплота передается от горячего теплоносителя к холодному через стенку, то есть осуществляется теплообмен между теплоносителем и поверхностью теплообмена. Наиболее низкий теплообмен наблюдается в газовых теплообменниках, и его интенсификация является актуальной задачей. К газовым теплообменникам относят аппараты для утилизации тепла газов промышленных печей, применяемые в металлургии. Так как большинство металлургических процессов являются высокотемператур-

ными, то область применения утилизаторов довольно широка. Написано значительное количество работ, посвящённых процессам теплообмена в различных по конструкции аппаратах [1–3], поиску эффективных форм поверхностей и различным способам интенсификации теплообмена [4–7]. Несмотря на это, и сегодня продолжается поиск новых конструктивных решений и методов интенсификации теплообменных процессов.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

На кафедре «Теории и автоматизации металлургических процессов и печей» СКГМИ (ГТУ) разработана лабораторная установка (рис. 1), позволяющая исследовать различные режимы теплообмена. Установка даёт возможность получить большее количество теплофизических параметров, необходимых для исследования и моделирования теплообмена, по сравнению с существующими аналогами [8, 9].

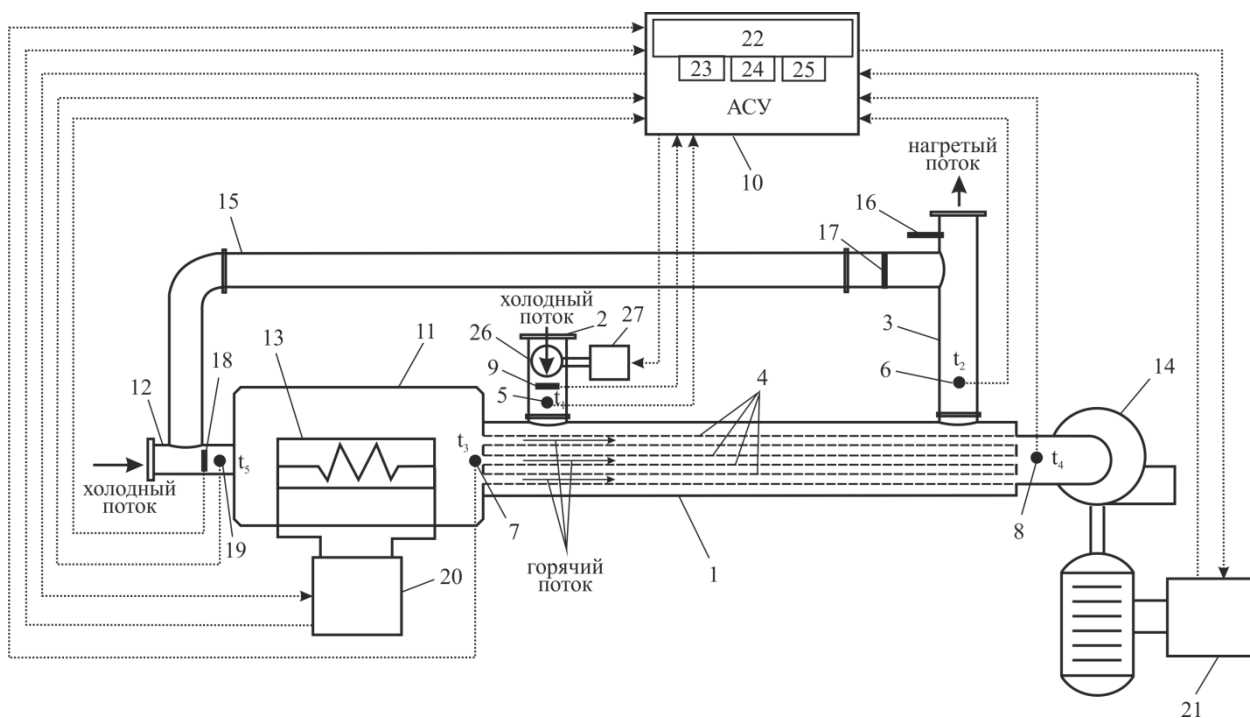


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – кожух; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – теплообменные элементы; 5–8 – термопары; 9 – расходомер холодного потока; 10 – автоматизированная система управления; 11 – эмулятор печи; 12 – входной канал; 13 – электронагреватель; 14 – тягодутьевое устройство; 15 – трубопровод; 16, 17 – шиберы; 18 – расходомер; 19 – термопара. 20 – устройством регулирования мощности; 21 – устройство регулирования частоты вращения двигателя; 22 – контроллер; 23 – устройство ввода аналоговых сигналов; 24 – устройство вывода аналоговых сигналов; 25 – устройство вывода дискретных сигналов; 26 – нагнетатель холодного потока; 27 – магнитный пускатель

Лабораторная установка включает кожух 1 с входным 2 и выходным 3 патрубками, размещённые внутри кожуха 1 теплообменные элементы 4, термопары 5, 6, 7 и 8, установленные во входном 2 и выходном 3 патрубках, а также на входе и выходе теплообменных элементов 4, расходомер холодного потока 9 и автоматизированную систему управления 10, соединённую каналами связи с термопарами 5–8 и расходомером 9. Установка снабжена эмулятором печи 11 с входным каналом 12 и установленным внутри электронагревателем 13. Причём эмулятор печи 11 соединён с теплообменными элементами 4, расположенными рядами, с образованием каналов для прохода горячего потока. На выходе теплообменных элементов 4 установлено тягодутьевое устройство 14. Входной 2 и выходной 3 патрубки кожуха 1 выполнены съёмными, с возможностью направления холодного потока по прямотоку или противотоку относительно горячего потока.

Выходной патрубок 3 кожуха 1 соединён трубопроводом 15 с входным каналом 12 эмулятора печи 11 с возможностью регулирования расхода теплового потока шиберами 16 и 17, установлен-

ными в выходном патрубке 3 кожуха 1 и соединительном трубопроводе 15. Во входном канале 12 эмулятора печи 11 дополнительно установлен расходомер 18 и термопара 19. Электронагреватель 13 снабжён устройством регулирования мощности 20, а тягодутьевое устройство 14 снабжено устройством регулирования частоты вращения двигателя 21, соединённым каналами связи с автоматизированной системой управления 10. Автоматизированная система управления 10 снабжена контроллером 22 с устройствами ввода аналоговых сигналов 23, вывода аналоговых сигналов 24 и вывода дискретных сигналов 25. Кожух 1 и его выходной патрубок 3, а также соединительный трубопровод 15 снабжены тепловой изоляцией, при этом во входном патрубке 2 кожуха 1 установлен нагнетатель холодного потока 26, который соединён через магнитный пускатель 27 с автоматизированной системой управления 10 каналом связи.

Лабораторная установка работает следующим образом. В эмулятор печи через входной канал поступает холодный поток, например воздух или газы, за счёт создания разрежения тягодутьевым устройством. В эмуляторе печи холодный поток

нагревается с помощью электронагревателя. Затем горячий поток поступает в теплообменные элементы, в которых осуществляется процесс теплообмена. Одновременно во входной патрубок поступает холодный поток, например воздух, за счёт нагнетателя. В результате теплообмена через стенку теплообменных элементов холодный поток нагревается, а горячий поток охлаждается. При этом охлаждённый поток выбрасывается в атмосферу через тягодутьевое устройство, а нагретый поток поступает в выходной патрубок. Причём нагретый поток может быть в полном объёме выброшен в атмосферу, а может быть направлен полностью или частично через соединительный трубопровод во входной канал.

Перераспределение потоков осуществляют за счёт регулирования сечения трубопровода и выходного патрубка с помощью шиберов. Использование соединительного трубопровода позволяет исследовать теплообмен, имитирующий работу рекуператора промышленных печей, а выполнение входного и выходного патрубков съёмными, с возможностью перемены их местами, позволяет исследовать теплообмен при противоточном или прямоточном движении потоков, что существенно расширяет функциональные возможности установки.

Регулирование интенсивности теплообмена и температурного режима осуществляют за счёт изменения частоты вращения двигателя тягодутьевого устройства, а также за счёт изменения мощности электронагревателя.

Управление теплообменом осуществляют автоматизированной системой управления, в которой данные с термопар, а также расходомеров поступают на устройство ввода аналоговых сигналов. После чего контроллер выполняет анализ поступивших сигналов и, согласно алгоритму управления, производит расчёт управляющих воздействий для нагревателя и тягодутьевого устройства. После этого сигнал поступает на регулятор мощности электронагревателя и на регулятор частоты вращения двигателя тягодутьевого устройства. Устройство вывода дискретных сигналов управляет электрическим пускателем нагнетателя холодного потока. Автоматизированная система управления позволяет легко изменять режимные параметры теплообмена и получать данные, позволяющие исследовать и моделировать этот процесс.

Результаты исследования и их обсуждение

Важнейшими параметрами, полученными при моделировании, является распределение температур и изменение температурного напора вдоль поверхности теплообмена. Для определе-

ния этих параметров запишем уравнения теплового баланса, а для пояснения представим схему теплообмена и характерные температурные профили горячего и холодного потоков (рис. 2).

– для горячего потока (контур K_1)

$$G_1 c_1 T' - G_1 c_1 T'' - Q = 0$$

$$\text{и } Q = -G_1 c_1 (T' - T''); \quad (1)$$

– для холодного потока (контур K_2)

$$G_2 c_2 t' + Q - G_2 c_2 t'' = 0$$

$$\text{и } Q = G_2 c_2 (t'' - t'), \quad (2)$$

где G_1, G_2 – массовый расход соответственно горячего и холодного потока, $\text{м}^3/\text{с}$; T' и T'' – температура горячего потока соответственно на входе и выходе из аппарата, $^\circ\text{C}$; t' и t'' – температура холодного потока соответственно на входе и выходе из аппарата, $^\circ\text{C}$; c_1, c_2 – теплоёмкость соответственно горячего и холодного потока, $\text{кДж}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$.

Для всей поверхности уравнение теплообмена можно записать в виде

$$Q = G_1 c_1 (T' - T'') = G_2 c_2 (t'' - t') = kF \Delta_{\text{cp}}, \quad (3)$$

где k – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; F – поверхность теплообмена, м^2 ; Δ_{cp} – средний температурный напор, $^\circ\text{C}$.

Уравнение теплообмена для элементарной поверхности df представим в виде следующих соотношений:

$$G_1 c_1 dT + k(T - t)df = 0$$

$$\text{и } G_2 c_2 dt - k(T - t)df = 0. \quad (4)$$

Введём относительную координату $x=f/F$, тогда $df=Fdx$, и из соотношения (4) получаем систему дифференциальных уравнений первого порядка

$$\begin{cases} \frac{dT}{dx} = -\frac{kF}{G_1 c_1} (T - t) = -a(T - t); \\ \frac{dt}{dx} = \frac{kF}{G_2 c_2} (T - t) = b(T - t), \end{cases} \quad (5)$$

где a и b – числа единиц переноса теплоты:

$$a = \frac{kF}{G_1 c_1}, \quad b = \frac{kF}{G_2 c_2}.$$

Эта система должна решаться с граничными условиями для точки начала отсчёта поверхности теплообмена f .

$$T = T' \quad \text{и} \quad t = t' \quad \text{при} \quad x = 0. \quad (6)$$

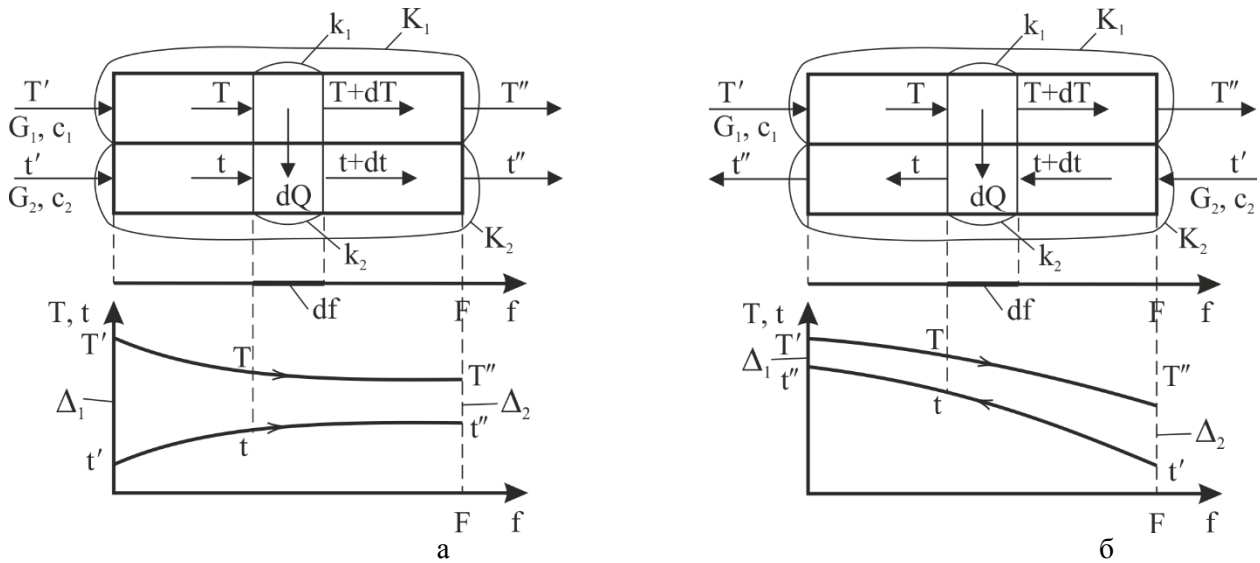


Рис. 2. Схема теплообмена и характерные температурные профили горячего и холодного потоков в режиме прямотока (а), противотока (б)

Наиболее общий способ решения – повышение порядка дифференциальных уравнений при сведении системы (5) к уравнению относительно одной из переменных T или t . Выразим из первого уравнения системы (5) температуру холодного потока

$$t = T + \frac{1}{a} \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

и продифференцируем её по x

$$\frac{dt}{dx} = \frac{dT}{dx} + \frac{1}{a} \frac{d^2T}{dx^2}, \quad (8)$$

а теперь подставим во второе уравнение системы (5) найденные значения

$$\frac{dT}{dx} + \frac{1}{a} \frac{d^2T}{dx^2} = b \left[T - \left(T + \frac{1}{a} \frac{d^2T}{dx^2} \right) \right], \quad (9)$$

откуда

$$\frac{d^2T}{dx^2} + (a+b) \frac{dT}{dx} = 0. \quad (10)$$

Решение этого однородного дифференциального уравнения второго порядка имеет вид

$$T = \lambda_1 e^{y_1 x} + \lambda_2 e^{y_2 x}, \quad (11)$$

где y_1 и y_2 – корни характеристического уравнения $y^2 + (a+b)y = 0$, так что $y_1 = 0$, а $y_2 = -(a+b)$. Тогда

$$T = \lambda_1 + \lambda_2 e^{-(a+b)x}. \quad (12)$$

Подставив в выражение (7) это значение T и производную $\frac{dT}{dx} = -\lambda_2 (a+b) e^{-(a+b)x}$, получим

$$t = \lambda_1 - \lambda_2 \frac{b}{a} e^{-(a+b)x}. \quad (13)$$

Постоянные интегрирования λ_1 и λ_2 найдем из граничных условий (6)

$$\begin{aligned} T' &= \lambda_1 + \lambda_2 \text{ и} \\ t' &= \lambda_1 + \lambda_2 \left(1 - \frac{a+b}{a} \right) = \lambda_1 - \frac{b}{a} \lambda_2. \end{aligned} \quad (14)$$

Отсюда

$$\lambda_1 = T' - \Delta \frac{a}{a+b} = t' + \Delta \frac{b}{a+b}, \quad (15)$$

$$\lambda_2 = \Delta \frac{a}{a+b}.$$

где $\Delta = T' - t'$.

Подставив значения постоянных интегрирования в (12) и (13), окончательно получим:

$$T = T' - \Delta \frac{a}{a+b} (1 - e^{-(a+b)x}); \quad (16)$$

$$t = t' + \Delta \frac{b}{a+b} (1 - e^{-(a+b)x}). \quad (17)$$

На входе в теплообменник ($x=0$) тождественно $T = T'$ и $t = t'$, на выходе: из него ($x=1$) получается

$$T'' = T' - \Delta \frac{a}{a+b} (1 - e^{-(a+b)}); \quad (18)$$

$$t'' = t' + \Delta \frac{b}{a+b} (1 - e^{-(a+b)}). \quad (19)$$

Найденные соотношения позволяют проследить изменение температурного напора вдоль поверхности F . Из выражений (16) и (17) следует

$$T - t = T' - t' - \Delta \left(\frac{a}{a+b} + \frac{b}{a+b} \right) (1 - e^{-(a+b)x}) \quad (20)$$

или $\Delta = \Delta e^{-(a+b)x}$.

Можно убедиться, что из выражения (20) по теореме о среднем напоре непосредственно получается известное уже выражение для средне-логарифмического температурного напора

$$\Delta_{cp} = \int_0^1 \Delta dx.$$

При этом надо учесть, что получаемые в ходе интегрирования фрагменты имеют следующий смысл применительно к прямоотку:

$\Delta = \Delta_1$; $\Delta e^{-(a+b)} = \Delta_2$; $a + b = \ln(\Delta_1 / \Delta_2)$.

С использованием приведённой методики составлена математическая модель процесса теплообмена и программа для ЭВМ, которая позволяет, применяя выражения (18) и (19), проследить изменение температур потоков и температурного напора вдоль поверхности теплообмена F (рис. 3). Проявить работу математической модели можно с помощью примера. Для примера в качестве горячего и холодного теплоносителя использовался атмосферный воздух с температурой $T'=300$ °С и $t'=25$ °С. Работа установки производилась в режиме прямоотка. При этом массовый расход горячего и холодного воздуха составлял соответственно $G_1 = 500$ м³/ч и $G_2 = 300$ м³/ч, суммарная поверхность теплообменных элементов лабораторной установки $F = 0,69$ м², а длина установки $l = 4$ м.

По результатам расчёта были построены температурные кривые (рис. 4).

Номер участка	Температура горячего потока	Температура холодного потока	Скорость газа	Температурный напор
0	300	25	20	275
1	282	58	18,8	224
2	266	87	18,3	179
3	251	114	17,8	137
4	238	138	16,9	100

Рис. 3. Расчётные значения примера реализации метода

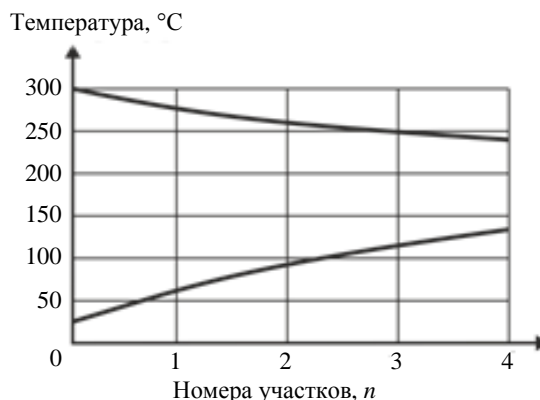


Рис. 4. Температурные кривые, полученные при реализации метода в установке

Продемонстрированный способ определения температурных кривых пригоден также для прототока, реализуемого в приведённой в данной работе установке. При этом в общем случае изменяются исходные дифференциальные уравнения и граничные условия. С использованием других частных подходов к решению задач теплообмена, приведённых в источниках литературы [10–12], можно расширять ещё и спектр полученных расчётных параметров, изучая, тем самым, процессы, протекающие в утилизационных установках рекуперативного типа и теплообмен в целом.

Заключение

Разработанная и приведённая в работе лабораторная установка позволяет решать задачи теплообмена широкого спектра с различными граничными условиями при разнообразных режимах эксплуатации, максимально приближенных к реальному процессу. В связи с этим установка является универсальной для изучения, исследования и моделирования процесса теплообмена. Она позволяет получить наглядное представление о теплопередаче, тепловых потоках, закономерностях, имеющих место при теплообмене, и является практическим учебным пособием при подготовке кадров высшей квалификации.

Список литературы

1. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия, 1980. 144 с.
2. Справочник по теплообменникам: В 2 т. Т.1 / пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко и др. М.: Энергоатомиздат, 1987. 352 с.
3. Попов И.А., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (Обзор) // Теплоэнергетика. 2012. №1. С. 3–14.
4. Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. М.: Энергия, 1966. 184 с.
5. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. М.: Энергия, 1977. 464 с.
6. Калинин Э.К. Эффективные поверхности теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
7. Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Дикарева А.В. Состояние, проблемы и стимулирование утилизации тепла газов промышленных печей // Цветная металлургия. 2011. №1. С. 30–35.
8. А. с. 1695123 СССР. Установка для исследования работы теплообменного аппарата / В.М. Спицин, В.И. Караваяев. Оpubл. 30.11.1991.
9. Пат. на полезную модель 65277 РФ. Лабораторная установка по теплопередаче / Т.А. Енютина, С.Г. Марченкова. Оpubл. 27.07.2007.
10. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Кн. 1, 2 / Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. и др.; под науч. ред. Айнштейна В.Г. М.: Химия, 2000. 1760 с.
11. Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Томилина А.А. Совершенствование и идентификация математической модели проковки углеродных материалов в барабанной вращающейся печи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. №2. С. 116–125.
12. Арунянц Г.Г., Рутковский А.Л. Математическое моделирование в задачах проектирования систем управления сложными объектами. Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО КГТУ, 2011. 304 с.

Поступила 22.02.17.

Принята в печать 07.06.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-95-101>

RESEARCH AND SIMULATION OF HEAT TRANSFER PROCESSES WITH THE HELP OF LABORATORY-SCALE RECUPERATORS

Tatiana E. Gerasimenko – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (the State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
E-mail: gerasimenko_74@mail.ru

Evgeny I. Meshkov – D.Sc. (Eng.), Professor
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (the State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
E-mail: eimeshkov@gmail.com

Nadezhda P. Gerasimenko – Undergraduate Student
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (the State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
E-mail: gerasimenko_np@mail.ru

Abstract

Problem Statement: This article describes a laboratory installation designed by the Department of Theory and Automation of Metallurgical Processes and Furnaces of the North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy

(the State Technological University). The article also describes how the installation functions and the research procedure applied. **Objectives:** This work aims to improve laboratory equipment to provide a visual representation of heat transfer processes. **Originality:** In compari-

son with its counterparts, this installation can help obtain a great number of thermal parameters which are necessary for studying and modeling of heat transfer processes.

Findings: The developed unit enables to study the heat transfer processes by way of simulation using a mathematical model based on the zonal method. Due to its design, the unit can be quickly re-adjusted to run in counter-flow mode instead of once-through mode. It has an automatic control and adjustment functionality. **Practical Relevance:** The unit gives an insight into heat transfer, heat flows and the heat exchange regularities, and it provides a practical guide which can be used for training highly qualified personnel.

Keywords: Mathematical modeling, study of heat transfer, laboratory units, recuperators.

References

1. Migay V.K. *Povyshenie effektivnosti sovremennykh teploobmennikov* [Improving the efficiency of modern heat exchangers]. Leningrad: Energiya, 1980, 144 p. (In Russ.)
2. *Spravochnik po teploobmennikam* [Handbook of heat exchangers]. In 2 volumes. Vol. 1, trans. from English. Ed. by O.G. Martynenko et al. Moscow: Energoatomizdat, 1987, 352 p. (In Russ.)
3. Popov I.A., Gortyshov Yu.F., Olimpiev V.V. Industrial application of intensified heat transfer technology – The current status of the problem (overview). *Teploenergetika* [Heat power engineering], 2012, no. 1, pp. 3–14. (In Russ.)
4. Antufiev V.M. *Effektivnost' razlichnykh form konvektivnykh poverkhnostey nagreva* [The effectiveness of convection heat surfaces of various design]. Moscow: Energiya, 1966, 184 p. (In Russ.)
5. Kern D., Kraus A. *Razvitye poverkhnosti teploobmena* [Extended heat transfer surfaces]. Moscow: Energiya, 1977, 464 p. (In Russ.)
6. Kalinin E.K. *Effektivnye poverkhnosti teploobmena* [Efficient heat transfer surfaces]. Moscow: Energoatomizdat, 1998, 408 p. (In Russ.)
7. Gerasimenko T.E., Meshkov E.I., Dikareva A.V. The status and the problems of industrial furnace gas heat recovery and the incentives for it. *Tsvetnaya metallurgiya* [Non-ferrous metallurgy], 2011, no. 1, pp. 30–35. (In Russ.)
8. Spitsin V.M., Karavaev V.I. *Ustanovka dlya issledovaniya raboty teploobmennogo apparata* [A unit for studying the heat exchanger in operation]. C.S. SU, no. 1695123, 1991.
9. Enyutina T.A., Marchenkova S.G. Patent RU, no. 65277, 2007. (In Russ.)
10. Einstein V.G., Zakharov M.K., Nosov G.A. et al. *Obshchiy kurs protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [The general course in chemical processes and units]. Ed. by Einstein V.G. Moscow: Khimiya, 2000, 1760 p. (In Russ.)
11. Gerasimenko T.E., Meshkov E.I., Tomilina A.A. Improving and identifying the mathematical model for the calcination of carbon materials in a rotary kiln. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, no. 2, pp. 116–125. (In Russ.)
12. Arounyants G.G., Rutkovskiy A.L. Mathematical modeling as part of designing control systems for complex objects. Kaliningrad: Publishing House of KSTU, 2011, 304 p. (In Russ.)

Received 22/02/17

Accepted 07/06/17

Образец для цитирования

Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Герасименко Н.П. Исследование и моделирование процессов теплообмена с помощью лабораторных установок рекуперативного типа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 95–101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-95-101>

For citation

Gerasimenko T.E., Meshkov E.I., Gerasimenko N.P. Research and simulation of heat transfer processes with the help of laboratory-scale recuperators. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 95–101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-95-101>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Азимов Холикназар Хакимович – аспирант, Институт химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан. E-mail: kholikazim@mail.ru

Алексеев Данил Игоревич – ассистент кафедры физической химии и химической технологии, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: alekseev41047@mail.ru

Амонов Ильхом Тимурович – канд. техн. наук, доц., профессор, Таджикский технический университет им. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан. E-mail: ilhomamonov@mail.ru

Белый Алексей Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: +7(3519) 22-45-87.

Билалов Дамир Харасович – ст. преп. кафедры металлургии, сварочного производства и методики профессионального обучения, Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: master_ddd@mail.ru

Ганиев Изатулло Наврузович – д-р хим. наук, проф., зав. лабораторией Института химии им. В.И. Никитина, академик АН Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан. E-mail: ganiev48@mail.ru

Герасименко Надежда Павловна – студент, ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», Владикавказ, Россия. E-mail: gerasimenko_nr@mail.ru

Герасименко Татьяна Евгеньевна – канд. техн. наук, доц., ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», Владикавказ, Россия. E-mail: gerasimenko_74@mail.ru

Гун Игорь Геннадьевич – д-р техн. наук, проф. кафедры технологий, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519)29-84-31.

Джурасва Мижгона Шералиевна – аспирантка, Институт химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан. E-mail: mijgona88@mail.ru

Енин Сергей Сергеевич – ассистент каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: enin_ss@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0313-6854>

Калмыков Вячеслав Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519)29-84-61. E-mail: prmpi@magtu.ru

Кнапинский Марчин – д-р техн. наук, декан, Ченстоховский технологический университет, Ченстохова, Польша.

Лехов Олег Степанович – д-р техн. наук, проф. кафедры автомобилей и подъемно-транспортных машин, Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: MXLehov38@yandex.ru

Лимарев Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры технологий, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519)29-84-31. E-mail: aslimarev@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1499-4988>.

Мазур Игорь Петрович – д-р техн. наук, проф., Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия. E-mail: mazur_ip@mail.ru

Мальцев Геннадий Иванович – д-р техн. наук, с.н.с., главный специалист Исследовательского центра АО «Урал-электромедь», Верхняя Пышма, Россия. E-mail: ngi@elem.ru

Мамбетова Юлия Данияровна – канд. техн. наук, ведущий специалист ООО «УралГеоПроект», Магнитогорск, Россия. E-mail: mambetova_yuliya@bk.ru

Мезин Игорь Юрьевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой технологий, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519)29-84-31. E-mail: mezinily1@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4074-9097>.

Мешков Евгений Иванович – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», Владикавказ, Россия. E-mail: eimeshkov@gmail.com

Михалев Александр Викторович – ст. преп. кафедры металлургии, сварочного производства и методики профессионального обучения, Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: mialex@trubprom.com

Николаев Александр Аркадьевич – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Телефон: 8 (3519) 22-45-87. E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru, alexniko@inbox.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5014-4852>.

Омельченко Евгений Яковлевич – д-р техн. наук, проф. кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: +7(3519) 22-45-87.

Петрова Ольга Викторовна – канд. техн. наук, доц. кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: (3519)29-84-61. E-mail: prmpi@magtu.ru

Попов Анатолий Иванович – нач. лаборатории Исследовательского центра АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия. E-mail: An.Popov@elem.ru

Селюков Алексей Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Открытые горные работы», Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Кемерово, Россия. E-mail: alex-sav@rambler.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7827-822X>.

Смирнов Андрей Николаевич – д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой физической химии и химической технологии,

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: sman@magtu.ru

Соломонов Константин Николаевич – д-р техн. наук, проф., Воронежский филиал Московского государственного университета путей сообщения, Воронеж, Россия. E-mail: konssol@list.ru

Стеблянко Валерий Леонтьевич – д-р техн. наук, проф. кафедры химии, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: v.steblyanko@mail.ru

Тимофеев Константин Леонидович – канд. техн. наук, главный гидрометаллург АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия. E-mail: K.Timofeev@elem.ru

Тишук Людмила Ивановна – зав. лаб., Воронежский филиал Московского государственного университета путей сообщения, Воронеж, Россия. E-mail: liudmila.tishchuk@mail.ru

Ушаков Михаил Юрьевич – старший инспектор-приемщик Центра технического аудита структурного подразделения ОАО «РЖД», Магнитогорск, Россия.

Федорин Николай Иванович – канд. техн. наук,

доц., Воронежский филиал Московского государственного университета путей сообщения, Воронеж, Россия.

Федосеев Сергей Анатольевич – д-р техн. наук, доц. кафедры математического моделирования систем и процессов, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия. E-mail: fsa@gelicon.biz

Фомин Николай Владимирович – ст. преп. кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: +7(3519) 22-45-87.

Чебан Антон Юрьевич – ст. науч. сотр., доц., Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук РАН (ИГД ДВО РАН), Хабаровск, Россия. Тел.: 8-(4212)32-79-27. E-mail: chebanay@mail.ru

Шевелев Максим Михайлович – инженер кафедры металлургии, сварочного производства и методики профессионального обучения, Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: MMShevelev@mail.ru

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления научной деятельности ученых МГТУ, в частности:

- РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
- МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.
- ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.
- ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
- ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ.
- СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ.
- МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
- НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.
- ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ.
- УПРАВЛЕНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ.
- ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ.
- СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ.
- ИНФОРМАЦИЯ И ДР.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТАТЬИ (на русском и английском языках)

1.1. Наименование статьи (не более 15 слов). Должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

1.2. Аффiliation. Указывается фамилия, имя, отчество авторов (транслитерация), ученая степень, звание, должность, индивидуальный авторский идентификатор ORCID, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.

1.3. Аннотация (200–250 слов). Включает постановку задачи (актуальность работы), цель, используемые методы (эксперименты), новизну, результаты, практическую значимость (направления развития).

Онлайн-перевод запрещается!

1.4. Ключевые слова: от 5 до 15 основных терминов.

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы)

2.2. Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

2.3. Результаты исследования и их обсуждение

2.4. Заключение (выводы)

2.5. Список литературы (на русском и английском языках)

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 6–8 стр.

3.2. Текст статьи, сведения об авторах, аннотация ключевые слова и список литературы представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word**, и распечаткой на стандартных листах бумаги формата А4.

При наборе статьи в **Microsoft Word** рекомендуются следующие установки:

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 11 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;

- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;

- **иллюстрации** не должны превышать ширины колонки (80 мм) или ширины страницы (170 мм). Для подписей элементов на иллюстрации используется шрифт TimesNewRoman 11 пт. Рисунки представляются в редакцию в двух форматах: редактируемом и нередактируемом (*.jpg; качество не менее 300 dpi). В тексте статьи должны быть подрисуночные подписи в местах размещения рисунков. В конце подписи к рисунку точка не ставится. Например:

Рис. 4. Расчётная зависимость $\gamma(t) = I_m / I_{н0}$ от времени и удалённости КЗ от выводов асинхронного двигателя

- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовков необходимо, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

3.3. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц **СИ**.

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Экспертное заключение о возможности опубликования.

4.2. Договор.

Внимание! Публикация статей является бесплатной. Преимущество опубликования предоставляется авторам и учреждениям, оформившим подписку на журнал.

Статьи проходят обязательное научное рецензирование.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Редколлегия журнала «Вестник МГТУ им. Г.И. Носова», М.В. Чукину.

Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@magtu.ru (с указанием темы сообщения «Вестник МГТУ»).