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

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЕСТНИК

№1 (19) 2020 г.

science.donntu.org

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

90 ЛЕТ ★ ★ ★ ИННОВАЦИЙ

НАУЧНЫЕ ИЗДАНИЯ Донецкого национального технического университета



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

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

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
05.02 Машиностроение и машиноведение;
05.05 Транспортное, горное и строительное машиностроение;
05.09 Электротехника;
05.16 Металлургия и материаловедение;
05.17 Химическая технология.

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



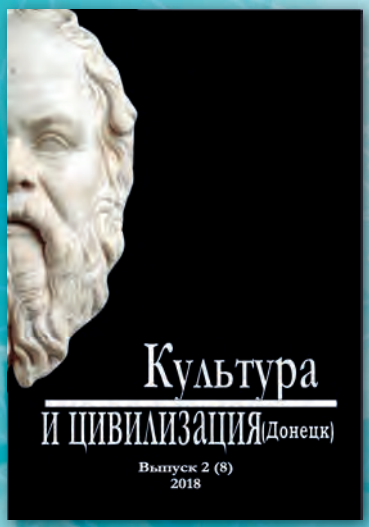
Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000125 от 20 апреля 2017 г. (сетевое издание)
Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000147 от 20 июня 2017 г. (печатное издание)
Приказ МОН ДНР №744 от 24.07.2017 г. о включении в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР
Лицензионный договор с РИНЦ № 177-04/2013 от 12.04. 2013 г.

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
05.02 Машиностроение и машиноведение.

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



Научный журнал «Культура и цивилизация (Донецк)»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000143 от 20.06.2017 г.
Приказ МОН ДНР №1134 от 01.11.2016 г. о включении в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР
Лицензионный договор с РИНЦ № 425-07/2016 от 14.07.2016 г.

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
09.00 Философские науки;
23.00 Политология.

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

Вестник ДонНТУ №1(19)'2020

международный научно-технический журнал

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

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

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

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

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

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

Вестник ДонНТУ
2020. №1(19)

ISSN 2518-1653 (online)

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

Свидетельство
о государственной регистрации
Серия ААА № 000133 от 27.05.2017

За содержание статей и их оригинальность несут ответственность авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов. За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Подписано к печати
по решению Ученого Совета
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»
Протокол №2 от 26.06.2020

Формат 60×84$^{1/8}$. Заказ 0320.
Изд-во «Донецкая политехника», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

С.И. Аввакумов
Применение систем дистанционного обучения при подготовке инженерных кадров 3

А.Е. Воробьев, А.Н. Корчевский, К.А. Воробьев
Возможности современного геоинжиниринга 9

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Д.А. Власенко
Обоснование конструктивных параметров и перспективы использования рифленых валков в четырехвалковых дробилках 15

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

В.П. Кондрахин, В.С. Новосельцев
Моделирование рабочего процесса виброщековой дробилки с горизонтальным расположением камеры дробления 23

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В.И. Калашников, В.Г. Черников, А.А. Горбунов
Сравнительная характеристика способов частотного регулирования асинхронного электропривода 29

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

И.М. Мищенко, Я.Ю. Асламова, А.В. Кузин, Н.Н. Коробкин, А.В. Полохин
Обоснование рациональных параметров слоя высокоофлюсованной шихты, формируемого на паллетах агломерационной машины 35

А.В. Яковченко, С.А. Снитко, В.В. Пилипенко, Н.И. Ивлева
Зависимость напряжения течения стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn, учитывающая при горячей прокатке процессы динамического преобразования структуры 45

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

А.Я. Бабанин, Б.Ф. Белов, А.Г. Пономаренко, Д.В. Первухин, А.Я. Минц, И.А. Абакумов
Классификация и структуризация силикатов кальция 53

ИНФОРМАЦИЯ

Требования к статьям, направляемым в редакцию 60

Информация об издании

– На страницах журнала публикуются научные статьи фундаментального и прикладного характера, информация о конференциях, семинарах и выставках; освещается деятельность ведущих научно-исследовательских и проектных институтов, промышленных предприятий и коммерческих организаций, технопарков.
– Журнал оказывает информационную поддержку в продвижении на рынок конкурентоспособной наукоемкой продукции, проектов, научно-технических разработок и высоких технологий в различных областях промышленности.
– Журнал распространяется бесплатно в эл. виде посредством сети Интернет; принимает участие в научных конференциях и выставках.
– Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Интернет: elibrary.ru
– Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК) ДНР. Интернет: vak.mondnr.ru
– Редакция журнала принимает к публикации и осуществляет рецензирование рукописей статей по химическим и техническим наукам и следующим группам специальностей: 05.02 – Машиностроение и машиноведение; 05.05 – Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.09 – Электротехника; 05.16 – Металлургия и материаловедение; 05.17 – Химическая технология.

VESTNIK DONNTU №1(19)'2020

international scientific-technical journal

Founder and publisher *Donetsk National Technical University (Donetsk)*

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

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

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

Editorial council:
Artyukh V. G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Belomerya N. I. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Bershadsky I. A. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Biryukov A.B. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Butuzova L.F. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Vysotsky Y.B. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Gorbatko S. V. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Gorbatyuk S. M. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Dedovets I.G. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Eron'ko S.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Zaharov N. I. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Kovalev A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kozhevnikova I. A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)
Kondrahin V.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kononenko A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kurennyiy E. G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Chentsov N. A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Shabayev O.E. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Shapovalov V.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
Yakovchenko A.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
** - staff members of the founder*

Address: 283001, Donetsk, 58, Artema St.
Phone +380 (62) 301-07-89
E-mail: vestnikdonntu@gmail.com
Internet: vestnik.donntu.org

Vestnik DonNTU
2020. No.1(19)

ISSN 2518-1653 (online)

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

Certificate of State Registration
Series AAA No. 000133
dated 27.05.2017

The content and originality of the articles is the author's responsibility. The editorial opinion may not necessarily represent the views of the authors. The content of advertising material is the advertiser's responsibility.

Subscribed to print
on the recommendation
of the Academic Council
Donetsk National Technical University
Protocol No.2 dated 26.06.2020

Format 60×84$^{1/8}$. Order 0320
Publishing house
"Donetsk Polytechnic", 2020

CONTENTS

SCIENTIFIC NOTES

S.I. Avvakumov
Application of distance learning systems in training engineering personnel 3

A.E. Vorobiev, A.N. Korchevsky, K.A. Vorobiev
The capability of modern geoengineering 9

ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

D.A. Vlasenko
Substantiation of design parameters and prospects for using fluted rolls in four-roll crushers 15

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION ENGINEERING

V.P. Kondrakhin, V.S. Novoseltsev
Modelling of the working process of the vibro-jaw crusher with a horizontal crushing chamber location 23

ELECTRICAL ENGINEERING

V.I. Kalashnikov, V.G. Chernikov, A.A. Gorbunov
Comparative characteristics of methods for frequency control of asynchronous electric drive 29

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

I.M. Mishchenko, Ya.Yu. Aslamova, A.V. Kuzin, N.N. Korobkin, A.V. Polohin
Substantiation of rational parameters of high-fluxed charge layer formed on pallets of an agglomeration machine 35

A.V. Yakovchenko, S.A. Snitko, V.V. Pilipenko, N.I. Ivleva
The function of the flow stress of steel 0,19C-0,20Si-0,40Mn with accounting the processes of dynamic transformation of the structure during hot rolling 45

CHEMICAL TECHNOLOGY

A.Ya. Babanin, B.F. Belov, A.G. Ponomarenko, D.V. Pervukhin, I.A. Abakumov, A.Ya. Mints
Classification and structure of calcium silicates 53

INFORMATION

Requirements for the papers submitted to the Editorial office 60

Publication Information

– The journal publishes research papers of fundamental and applied nature, information on conferences, seminars and exhibitions. It covers the activities of the leading research and design institutes, industrial and commercial companies and technology parks.
– The journal provides information support for the marketing of competitive high-tech products, projects, scientific and technical developments and high technologies in various fields of industry.
– The journal is distributed free of charge in electronic format via the Internet. It provides informational support and participates in International scientific conferences and exhibitions.
– The journal is included into the Russian Index of Science Citation (RISC). Internet: elibrary.ru
– The journal is included in the list of peer-reviewed scientific publications of the Higher Attestation Commission (VAK) of the DPR. Internet: vak.mondnr.ru
– The editorial accepts for publication and reviews manuscripts on chemical and technical sciences, and the following groups of specialties: 05.02 – Engineering and engineering science; 05.05 – Transport, mining and construction engineering; 05.09 – Electrical engineering; 05.16 – Metallurgy and materials science; 05.17 – Chemical technology.

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

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

Рассмотрен практический опыт внедрения систем дистанционного обучения при подготовке кадров высшей квалификации в Донецком национальном техническом университете и приведен критический анализ целесообразности применения дистанционного обучения при подготовке инженерных кадров. Полученные результаты показывают, что дистанционное обучение не является самодостаточной формой обучения в сфере профессионального образования, главным образом в технических дисциплинах и специальностях. Поэтому при подготовке инженерных кадров еще предстоит осуществить поиск баланса между дистанционной и другими (традиционными) формами обучения.

Ключевые слова: *дистанционное обучение, Интернет, система дистанционного обучения, электронное обучение.*

Одним из современных трендов подготовки специалистов в различных областях деятельности является внедрение дистанционного обучения. Из года в год количество образовательных учреждений, вводящих дистанционную форму обучения, только увеличивается. Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ) не исключение.

Опыт практического внедрения системы дистанционного обучения в ДонНТУ рассмотрен в работе [1]. Полученные А.Л. Сотниковым и коллегами результаты наталкивают на мысль о нецелесообразности применения дистанционного обучения при подготовке инженерных кадров. Рассмотрению этого вопроса и посвящена данная работа.

Из всего многообразия существующих систем дистанционного обучения (INDIGO, WebTutor, Mirapolis LMS, Uchi.Pro, iSpring Online, EduTerra.PRO, Teachbase и др.) предпочтение для практического освоения и внедрения в ДонНТУ было отдано двум системам дистанционного обучения, а именно MOODLE и GRAND CLASS. Следует отметить, что принцип работы всех известных систем дистанционного обучения примерно одинаковый и выбор в основном связан с доступностью и надежностью системы, а также удобством работы и взаимодействия преподавателя и обучающихся. Также следует обратить внимание, что на сегодняшний день существует несколько синонимов понятия «система дистанционного обучения», а именно – система управления курсами, система управления (электронным/дистанционным) обучением, виртуальная обучающая среда (англ.), платформа дистанционного обучения. В общем виде все известные системы дистанционного обучения представляют собой веб-приложения для создания интернет-сайтов обучения в режиме реального времени.

Как правило, в образовательных учреждениях при разработке курсов для систем дистанционного обучения за основу берутся утвержденные рабочие программы дисциплин, а также ранее изданные учебники и/или учебные пособия, материал которых перерабатывается в электронный формат, иногда с добавлением интерактивных элементов. Обычно это дополнительные видео-, аудио-, фото- и другие материалы. В любом случае, данный подход накладывает ряд ограничений, связанных и узкими рамками утвержденных рабочих программ, и существенно сокращает трудозатраты на разработку и внедрение новых курсов дистанционного обучения. Естественно, такой подход имеет и существенные недостатки, о чем будет сказано далее.

Для примера в ходе практического освоения и внедрения систем дистанционного обучения авторами работы [1] были выбраны два таких учебных пособия (рис. 1) – «Эксплуатация подшипников качения» [2], которое было издано в 2014 году, и «Монтаж промышленных машин» [3] – изданное в 2019 году. В данных работах авторы, исходя из опыта практической деятельности, изложили материалы в доступном для понимания формате.

В учебном пособии «Эксплуатация подшипников качения» рассмотрен ряд основных вопросов, связанных с эксплуатацией подшипников качения, что явилось обобщением опыта работы авторов на промышленных предприятиях. Также рассмотрены вопросы входного контроля [4], сборки и разборки [5], обслуживания и контроля состояния подшипников качения [6]. Приведена классификация повреждений подшипников качения для решения задач генезиса и опре-

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

деления причин неисправностей промышленных машин. Показаны основные причины повреждений подшипников качения при нарушении их смазывания.

В учебном пособии «Монтаж промышленных машин» рассмотрены вопросы монтажа машин и механизмов на промышленных предприятиях. Приведены основные определения и характеристика процесса монтажа машин, фундаментов под машины, а также основные положения организации работ по монтажу машин. Рассмотрены практические примеры применения современных инструментов и приборов для монтажа [7], выверки [8], регулировки [9], испытания и контроля состояния машин и механизмов [10]. Уделено внимание вопросам сварки металлоконструкций, а также смазки машин и механизмов.

Оба пособия рекомендуются как для студентов, обучающихся по направлениям «Машиностроение» и «Инженерная механика», так и для инженерно-технических работников эксплуатационных и ремонтных служб промышленных предприятий, монтажных и сервисных организаций. Пособия размещены в открытом доступе в Российском индексе научного цитирования, что всегда дает возможность обращаться к первоисточнику при возникновении каких-либо неопределенных ситуаций у обучающихся. Учебные пособия содержат богатый иллюстрационный материал, что предрасполагает их использование для разработки курсов дистанционного обучения.

Совместно с Донским государственным техническим университетом на портале дистанционного обучения (http://spec.skif.donstu.ru/) был разработан курс «Подшипники» на основе учебного пособия «Эксплуатация подшипников качения» (рис. 2). В основе портала дистанционного обучения используется система MOODLE.

При поддержке компании GRAND SCHOOL на их платформе дистанционного обучения GRAND CLASS (https://0713019870.grandclass.net/) было разработано несколько курсов обучения, в частности курс «Монтаж промышленных машин» на основе одноименного учебного пособия (рис. 3).

Обе системы при разработке курсов обучения позволяют рационально структурировать учебный материал, использовать учебные материалы различных форматов, в них доступны текстовый редактор, редактор формул, вставка видеороликов и изображений, создание различных тестов. При этом платформа GRAND CLASS выгодно отличается интуитивным интерфейсом создания курсов обучения и дальнейшей работы с ними, что и определило выбор данной системы для дальнейшего использования в образовательном процессе.



Рис. 1. Учебные пособия, использованные для практического освоения и внедрения систем дистанционного обучения

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

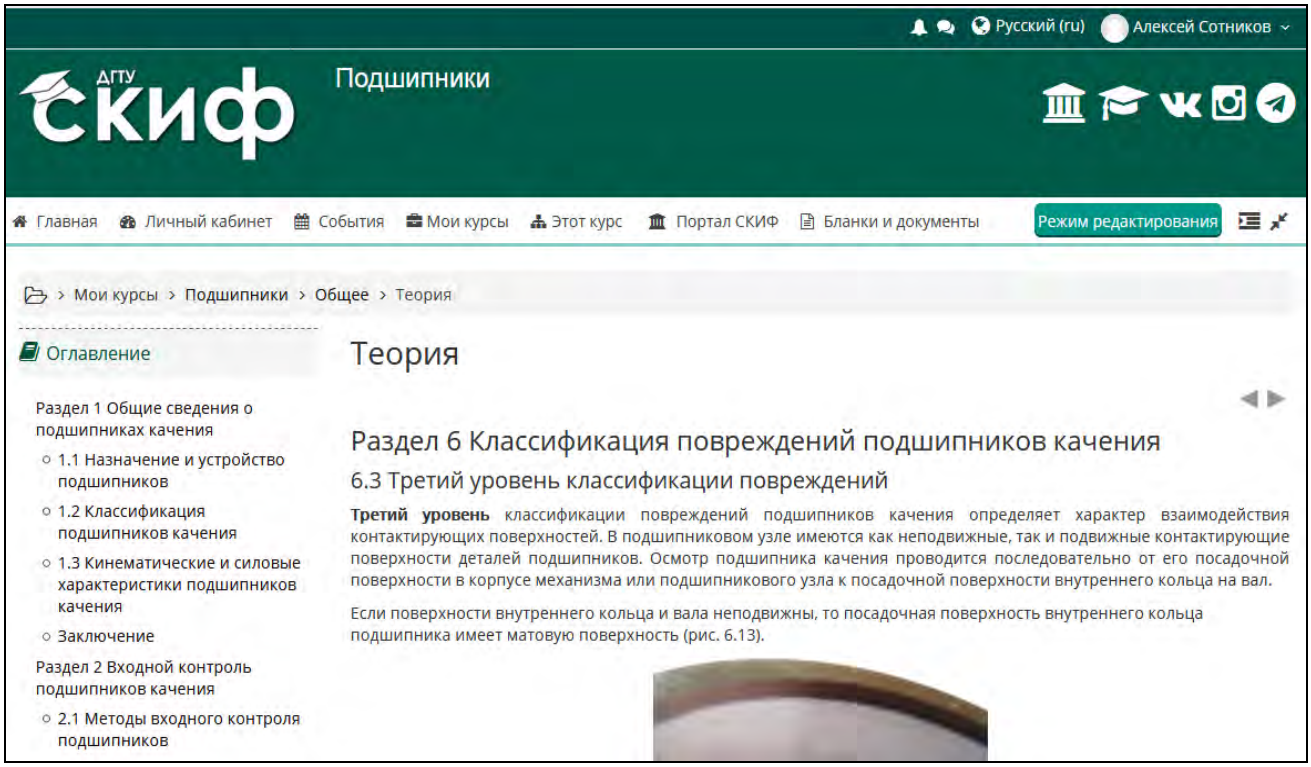


Рис. 2. Курс «Подшипники» на портале дистанционного обучения Донского государственного технического университета, http://spec.skif.donstu.ru/



Рис. 3. Курс «Монтаж промышленных машин» на платформе дистанционного обучения GRAND CLASS, https://0713019870.grandclass.net/

С целью сравнительного анализа очной и дистанционной форм обучения, а также изучения целесообразности внедрения и эффективности систем дистанционного обучения в ДонНТУ был проведен практический эксперимент [1].

В течение четырех лет преподавание профессиональных дисциплин осуществлялось по очной и дистанционной формам обучения. В первые два года эксперимента очная форма обучения включала проведение аудиторных лекционных и прак-

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

тических занятий с обязательным выполнением индивидуального задания по дисциплинам. Следующие два года эксперимента для преподавания тех же дисциплин использовалась дистанционная форма. Каждый курс обучения начинался и заканчивался независимым анкетированием обучающихся [1]. В табл.1 приведены выборочные результаты итогового анкетирования обучающихся по окончании изучения дисциплин.

Результаты анкетирования показали, что обучающиеся дистанционной формы обучения в большей степени нуждаются в консультациях преподавателя по электронной почте, чем очной формы обучения. А вот необходимость консультаций преподавателя на занятиях в аудитории больше испытывают обучающиеся очной формы обучения, чем дистанционной формы.

Таким образом, очевидным является дефицит прямого общения между преподавателем и обучающимися для очной формы обучения. В данной ситуации актуальным становится вопрос о рациональном количестве обучающихся в группе, исходя из возможностей преподавателя уделить достаточное внимание во время занятий каждому из них. Опытным путем установлена численность обучающихся в группе – 6 человек. При дистанционной форме обучения обучающиеся больше адаптируются к условиям самостоятельной работы и самодисциплинируются.

Что касается предпочтений выбора, как стоял вопрос в анкете, между дистанционной и очной формами обучения, обучающиеся очной формы обучения совсем не склоняются только к дистанционной форме обучения, в отличие от обучающихся дистанционной формы, которые в своем большинстве выбор отдают именно этой форме. При этом все обучающиеся являются сторонниками совмещения очной и дистанционной формы обучения.

Относительно форм организации самостоятельного изучения дисциплины мнение обучающихся совпадает. Они определили презентации, пошаговые инструкции и видеолекции самыми приоритетными формами. Менее эффективными они считают лекции в текстовом виде, учебники и учебные пособия, что наводит на размышление о том, что обучающиеся предпочитают пассивно потреблять информацию, а не создавать собственное понимание предметного содержания дисциплины. Именно этот феномен и является главной проблемой развития дистанционного обучения. В связи с этим требуется пересмотр модели взаимодействия преподавателя и обучаемых, методов и технологий обучения.

Общеизвестными достоинствами дистанционного обучения являются:

– не нужно тратить время на посещение аудиторных занятий;

– можно самостоятельно планировать график и программу обучения;

– можно получить гораздо больше знаний, т.к. они не ограничиваются рамками конспекта лекций (учебного пособия, учебника) преподавателя;

– сроки обучения зависят исключительно от самих обучающихся, что предусматривает возможность досрочного изучения дисциплин.

Табл. 1. Результаты итогового анкетирования обучающихся по окончании изучения дисциплин

№ п.п.	Вопросы	Варианты ответов	Учебный год	
			2016/2017	2018/2019
1	Необходимы ли Вам консультации по электронной почте?	да	44	70 ↑
		необязательно	56	25 ↓
		нет, сам справлюсь	0	5
2	Необходимы ли Вам консультации на занятиях в аудитории?	да	62	43 ↓
		необязательно	38	44 ↑
		нет, сам справлюсь	0	13
3	Насколько активно Вы используете социальные сети для диалога с преподавателем?	активно	38	45 ↑
		не всегда	31	38 ↑
		не использую	31	17 ↓
4	Что бы Вы выбрали, если выбор стоял бы между дистанционным или очным обучением?	дистанционное	0	50 ↑
		и то и другое	69	50 ↓
		очное	31	0
5	В каком виде Вам хотелось бы получать материалы для самостоятельного изучения дисциплины?	видеолекции	22	18 ↓
		текстовые лекции	14	19 ↑
		аудиолекции	3	1
		презентации	31	28 ↓
		инструкции	25	26 ↑
		учебники и пособия	3	9 ↑
		не важно	3	0

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

Наряду с этим следует выделять и главные недостатки дистанционного обучения:

– отсутствует прямое живое общение между преподавателем и обучающимися, особенно при практической подготовке;

– необходимо наличие технических средств для доступа в Интернет, а соответственно, и к источникам информации;

– дистанционная форма обучения подходит для людей способных к самомотивации, самоорганизации и самодисциплине;

– высокая стоимость и трудоемкость создания и администрирования системы дистанционного обучения, включая разработку самих курсов обучения.

Благодаря полученным авторами работы [1] результатам практического освоения и внедрения систем дистанционного обучения стало очевидным, что дистанционное обучение не является самодостаточной формой обучения в сфере профессионального образования, главным образом в технических дисциплинах и специальностях.

Каким бы интерактивным и мультимедийным ни был курс дистанционного обучения, без практической подготовки обучающиеся не смогут полноценно изучить дисциплину или освоить знания и навыки по специальности, например, в области неразрушающего контроля и испытательных лабораторий. В данном случае дистанционное обучение следует рассматривать как дополнительную форму обучения.

Немаловажным является развитие физических форм обучения, например, путем физического моделирования различных машин, механизмов, систем, установок и агрегатов, особенно проведением различных тематических конкурсов [11,12]. Не следует также забывать и о необходимости совершенствования традиционных форм обучения [13,14].

ДонНТУ поступательно движется в направлении внедрения систем дистанционного обучения при подготовке инженерных кадров, соблюдая опытным путем баланс между дистанционной и традиционными формами обучения, и данный процесс уже необратим. Следует отметить значительный вклад коллектива ученых и специалистов ДонНТУ под руководством и при непосредственном участии д.т.н., профессора кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии им. проф. В.В. Седуша» Алексея Леонидовича Сотникова в развитии всех вышерассмотренных форм обучения в университете.

Список литературы

1. Сотников, А.Л. Особенности дистанционного обучения / А.Л. Сотников, И.Ф. Муханова // Вестник ДонНТУ. – 2018. – №3. – С. 3-8.
2. Сидоров, В.А. Эксплуатация подшипников качения / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2014. – 175 с.
3. Сотников, А.Л. Монтаж промышленных машин. – Донецк: ООО «Университетские технологии», 2019. – 84 с.
4. Сидоров, В.А. Входной контроль подшипников качения / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2011. – №3. – С. 5-14.
5. Сидоров, В.А. Сборка и разборка подшипниковых узлов / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников, С.И. Аввакумов // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2011. – №3. – С. 15-24.
6. Сотников, А.Л. Задачи и методы контроля и диагностирования технологического оборудования МНЛЗ // Металлургические процессы и оборудование. – 2014. – №3(37). – С. 33-44.
7. Сотников, А.Л. Сборка крупногабаритных резьбовых соединений методом приложения осевых сил / А.Л. Сотников, С.В. Щербина // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2017. – №5(48). – С. 167-174.
8. Шоломицкий, А.А. Высокоточный измерительный комплекс «ВИЗИР 3D» / А.А. Шоломицкий, А.Л. Сотников // Простоев.НЕТ. – 2014. – №1. – С. 52-58.
9. Совершенствование технологий контроля положения и выставки оборудования МНЛЗ / С.Г. Могильный [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2012. – №3(29). – С. 12-25.
10. Нормирование режимов работы и уровня вибрации механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / А.Л. Сотников [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2013. – №1(31). – С. 44-54.
11. Сотников, А.Л. Итоги конкурса «Физическое моделирование и робототехника-2011» / А.Л. Сотников, Н.А. Родионов // Теория механизмов и машин. – 2011. –№2(18). Т.9. – С. 90-95.
12. Сотников, А.Л. Итоги конкурса «Высокие технологии в металлургическом производстве» // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – №2(16). – С. 6.
13. Шоломицкий, А.А. Перспективы развития дисциплины «Начертательная геометрия» / А.А. Шоломицкий, Е.С. Писанка, А.Л. Сотников // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2013. – №3. – С. 179-184.

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

14. Онищенко, В.П. Состояние и перспективы развития учебной дисциплины «Теория механизмов и машин» в Донецком национальном техническом университете / В.П. Онищенко, А.Л. Сотников // Теория механизмов и машин. – 2010. – №2(16). Т.8. – С. 80-84.

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

Статья поступила 21.02.2020 г.
© С.И. Аввакумов, 2020



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

УДК 622.011

А.Е. Воробьев /д.т.н./
НП «Инновационное недропользование» (Москва)
А.Н. Корчевский /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
К.А. Воробьев
ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» (Москва)

ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННОГО ГЕОИНЖИНИРИНГА

Представлены базовые подходы и основные принципы геоинжиниринга. Дано понятие геоинжиниринга и показаны области его применения (атмосферные явления, гидрология и др.). Детализирована схема ионосферы и возможности проекта HAARP (США). В связи со значительным влиянием на биосферу Земли к геоинжинирингу была отнесена мировая добыча разнообразных полезных ископаемых и глобальное загрязнение окружающей среды (атмосферы, гидросферы и почв). Раскрыты возможные риски геоинжиниринга. Описан подход ООН к управлению геоинжинирингом и представлены основные принципы, регулирующие его деятельность.

***Ключевые слова**: геоинжиниринг, геовоздействие, геосферы Земли, риски, подходы, принципы, управление.*

Геоинжиниринг представляет собой современные технологии контролируемого и целенаправленного управления глобальными геопроцессами и явлениями (климатом, местной погодой, прозрачностью атмосферы, альбедо земной поверхности, направлением и течением рек, образованием крупных водохранилищ – искусственных морей и т.д.), т.е. довольно масштабные контролируемые манипуляции природными геосистемами Земли [1].

Одной из основных целей геоинжиниринга является попытка стабилизации климатической системы Земли путем целенаправленного и контролируемого регулирования ее имеющегося энергетического баланса.

Активным сторонником применения технологий геоинжиниринга на практике являлся д-р Джон Холдрен. Этот ученый в течение многих лет всесторонне изучал проблему глобального потепления земного климата [2] и с позиции ведущего эксперта в этом вопросе настаивал на скорейшем применении превентивных мер борьбы с имеющимся в земной атмосфере парниковым эффектом.

Хотя для современного развития человеческого общества резкое сокращение имеющихся объѐмов выбросов парниковых газов является наивысшим приоритетом, созданная при ООН Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC) считает, что этого в настоящее время уже явно недостаточно. Поэтому появились различные предложения о необходимости удаления из атмосферного воздуха Земли содержащихся в нем гигантских объѐмов углекислого газа, а также аэрозолей различных примесей, взвесей и загрязнений [3].

В результате были разработаны такие запатентованные технологические решения, как «Устройство очищения атмосферы от примесей» (№ 3722183), выданное 27 марта 1973 г., «Образование и устранение микрочастиц» (№ 4684063) – 4 августа 1987 г., «Метод подавления образования инверсионных следов и соответствующее решение» (№ 4766725) – 30 августа 1988 г., «Метод подавления образования инверсионных следов и соответствующее решение» (№ 5005355) – 9 апреля 1991 г., «Метод подавления образования инверсионных следов и соответствующее решение» (№ 5110502) – 5 мая 1992 г., «Метод предотвращения образования и рассеивания атмосферных инверсий, стимуляции циркуляции воздуха в приземном слое и улучшения качества городского воздуха» (№ 5425413) – 20 июня 1995 г., «Система измерения расхода газа ультразвуковым способом» (№ 6539812) – 1 апреля 2003 г., «Метод и прибор для очистки атмосферы» (№ 6569393) – 27 мая 2003 г., «Метод экстракции и улавливания двуокиси углерода» (№ 6890497) – 10 мая 2005 г., «Метод удаления аэрозолей из атмосферы» (№ 7965488) – 9 ноября 2007 г., «Утилизация двуокиси углерода с помощью морской воды» (№ 8048309) – 28 августа 2008 г., «Улавливание углерода и выработка водорода и гидрида» (№ 8012453) – 27 октября 2008 г., «Устройство для экстракции и улавливания двуокиси углерода» (№ 7655193) – 2 февраля 2010 г.

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

Кроме того, геоинжиниринговые разработки включают в себя различные технологии, имитирующие деятельность природных вулканов, выбрасывающих в земную атмосферу различные вещества (химические соединения в виде газов, аэрозолей, твердых частиц и т.д.), что позволяет качественно-количественно изменить значение ее отражательной способности.

В частности, учѐные из Гарварда в 2019 г. собирались провести первый натурный эксперимент в области солнечного геоинжиниринга. Бюджет первой стадии этого эксперимента был запланирован в размере 3 млн. долл.

В ходе реализации такой исследовательской программы было запланировано запустить над юго-западом США в земную атмосферу управляемый стратостат и осуществить распыление из него на высоте около 20 км наночастиц (размером 0,0005 мм) карбоната кальция (мела), которые экологичнее и безопаснее (в первую очередь – для озонового слоя), чем диоксид серы.

В ходе проведения этого натурного эксперимента было запланировано распыление нескольких порций мела, по 100 г каждая (в общей совокупности – в количестве меньше 1 кг). После чего планировалось, что этот летательный аппарат будет обеспечивать постоянный мониторинг и регистрацию того, что происходит с распыленной аэрозолью, озоном и атмосферным воздухом, отслеживая с помощью специального лазера миграцию шлейфа наночастиц, а также осуществлять отбор образцов воздуха. В технической стороне этого эксперимента было запланировано участие Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) США.

Среди различных способов обеспечения технологий геоинжиниринга определенный практический интерес вызывает распыление в земной атмосфере морской воды (проект британских ученых из университетов Манчестера и Эдинбурга), что позволит увеличить имеющееся значение ее отражающей способности, т.е. образовать барьер для проникновения солнечных лучей к земной поверхности. Также предлагалось распылять сульфатные аэрозоли в течение одного года с воздушного шара в американском штате Нью-Мексико на высоте 24000 м, чтобы создать в земной атмосфере защитный слой, не отражающий, а поглощающий солнечную радиацию. Считается, что в этом случае нижние слои атмосферы Земли будут меньше нагреваться [2].

Однако есть и альтернативное предложение решения проблемы глобального потепления земного климата, выдвинутое в качестве специального проекта от NASA: целесообразно отражать часть солнечного света от Земли в космическое пространство, для чего необходимо запустить на космическую орбиту гигантские зеркала, предназначенные для отражения определенной части солнечного света или, возможно, отдельной части его спектра.

Мегаканалы (уже имеющиеся Суэцкий, Панамский и Гѐта, а также только еще планируемые – Евразия, Стамбул, Каспий – Персидский залив), соединяющие через континенты различные моря и даже океаны, также являются объектами геоинжиниринга. К этим же объектам относятся и протяженные каналы от речной сети: один из самых больших по протяженности – Юньхэ (1990 км), Беломорско-Балтийский, Волго-Донской, Среднегерманский, Рейн – Майн – Дунай, Эри, Каракумский, Кызылкумский, знаменитый ташкентский канал Салар возрастом более 1000 лет, Большой Чуйский канал (рис. 1).

К этой же группе гидрологического инжиниринга необходимо отнести создание искусственных морей или же, наоборот – осушение морей, крупных озер и болот, а также создание в акваториях искусственных островов и городов (рис. 2).



Рис. 1. Каналы Ташкента и Бишкека

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



Рис. 2. Города на искусственных морских островах

В совокупности эти три основных подхода (борьба с парниковым эффектом и нагреванием биосферы прямыми солнечными лучами вместе с крупнейшими гидрологическими технологиями) и получили название «геоинжиниринг» [3].

Кроме того имеются и другие проекты геоинжиниринга:

– «засев» железа в океане также предназначенный для удаления парниковых газов. Так, в июле 2012 г. предприниматель Расс Джордж в нескольких сотнях миль к западу от острова Хайда-Гваи (Тихий океан) рассеял в морской воде 91 т железо-сульфатной пыли. Предполагалось, что ранее дефицитное в океанической воде железо будет способствовать большему производству фитопланктона;

– защита или расширение ареалов распространения полярного морского льда и ледников, включая использование изолирующих «одеял» или искусственного снега, с использованием светлых материалов (похожий патент США на изобретение от 31 августа 1982 г. «Белый покровный листовой материал, способный отражать ультрафиолетовые лучи», № 4347284 и др., для того чтобы изменить значение яркости вод океанов, увеличивая величину альбедо их поверхности, или путем распределения полых стеклянных шариков в заранее выбранных областях, чтобы увеличить ледяной покров и снизить общую температуру биосферы;

– создание и переход в сельском хозяйстве на массовое использование генно-модифицированных растений с большей отражающей способностью.

В конце XX в. много вопросов вызывал американский проект HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program) (рис. 3), размещенный на Аляске и официально предназначенный для исследований свойств ионосферы.

Теоретический фундамент HAARP заложил советско-французский натурный эксперимент «Аракс», проведѐнный ещѐ в начале 80-х гг. XX века [4]. Тогда с французского спутника, проходившего над островом Кергелен в Индийском океане, был произведѐн выстрел пучком электронов, направленный вдоль геомагнитной линии, а соответствующие ему отклики ионосферы регистрировались в пос. Согра (Архангельская область, РФ) специальной геофизической станцией.

В ходе последующих теоретических и экспериментальных (прежде всего – натурных) исследований ионосферы было установлено, что величина излучаемой мощности от нагревных стендов (проект HAARP и др.) существенно влияет на численные характеристики ионосферы, такие как [4]:

– температура электронного газа;

– концентрация электронов;

– генерация неоднородностей электронной плотности;

– частота геомагнитных пульсаций;

– свечение вещества;

– ускорение заряженных частиц слоя и др.

Однако такие технологии геоинжиниринга (при их существенном масштабировании) могут спровоцировать неожиданные и даже непредсказуемые довольно серьезные последствия для биосферы Земли в целом [5]:

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



Рис. 3. Схема ионосферы и возможности программы HAARP [5]

– есть риск, что существенно изменится циркуляция воздушных потоков в земной атмосфере и, соответственно, сложившийся режим выпадения осадков в разных районах Земного шара;

– диоксид серы способен повредить озоновый слой, защищающий Землю от вредоносного влияния ультрафиолетового излучения;

– от уменьшения потока солнечного света или изменения его спектра могут пострадать имеющиеся сельскохозяйственные культуры. Так, недавнее исследование в этой области получило следующие результаты: после извержения вулкана на Филиппинах и последующих некоторых проявлений «вулканической зимы» во многих странах заметно снизились урожаи злаковых (пшеницы, риса, кукурузы и др.), имеющих значительный вклад в продовольственную систему человечества, зато дикорастущие деревья в лесах резко пошли в рост;

– из-за аэрозолей в стратосфере изменится цвет неба.

При этом с каждой такой геоинженерной технологией связаны свои риски и сомнения. Например, объективно протестировать эффективность геотехнологии управления солнечным излучением (SRM) в глобальном масштабе можно лишь одним способом – провести натурные эксперименты в реальной окружающей среде [5]: либо распыляя определенные частицы в стратосфере, либо искусственно модифицируя имеющиеся атмосферные облака. Такие натурные испытания должны выяснить, сможет ли технология SRM в реальности достичь отражения достаточного количества солнечного света, чтобы охладить на нужную величину нашу планету. Однако, возможно, что даже одних этих натурных экспериментов будет достаточно, чтобы нанести непоправимый вред эволюционно сложившейся биосфере Земли [6…9]. Так, из разработанных теоретических моделей динамики земной атмосферы явно следует, что широкое применение технологий SRM довольно существенно изменит количество дождевых, градовых и снеговых атмосферных осадков во всём мире, перераспределит ветровые потоки и одновременно нарушит озоновый слой, а, следовательно, – значительно ухудшит жизнедеятельность сотен миллионов людей.

В 2020 г. во время Всемирного экономического форума (ВЭФ) в Давосе международная группа экспертов подготовила доклад, где были раскрыты наиболее вероятные и довольно серьезные угрозы для человечества. По их заключению, все они имеют первопричиной существенное изменение глобального климата Земли.

Так, по мнению экспертов ВЭФ, в числе главных угроз для человечества оказались следующие:

– экстремальные погодные явления;

– серьезные неудачи и просчеты в борьбе с изменениями глобального климата;

– природные стихийные явления;

– снижение биологического разнообразия;

– природные бедствия, вызванные человеческой деятельностью.

По значимости воздействия на биосферу к геоинжинирингу необходимо отнести и добычу разнообразных и многочисленных полезных ископаемых, ежегодные объемы добычи которых в мире составляют около 20 млрд. т (в том числе неметаллических полезных ископаемых – 13 млрд. т, угля – 8012,8 млн. т, нефти – около 3 млрд. т, газообразных – 1,5 трлн. $м^3$). Эта геомасса при извлечении на дневную поверхность оказывает существенное влияние практически на все геооболочки Земли – гидросферу, литосферу (почвы), атмосферу (рис. 4) и биосферу.

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



Рис. 4. Горящие терриконы угольных шахт

Здесь же необходимо отметить и глобальную проблему загрязнения биосферы. В частности, Мировой океан неуклонно меняет свой химический состав (прежде всего из-за изменения температуры его вод), и происходит изменение его pH. Кроме того, многие реки (например, р. Читарум в Индонезии, куда сбрасывают производственные отходы около 500 промышленных предприятий и 9 млн. человек напрямую отправляют бытовой мусор и канализационные отходы; р. Янцзы, третья по величине река мира, в которую сбрасывают отходы 17 тыс. городов КНР, а также 400 тыс. промышленных предприятий) уже загрязнены катастрофически (рис. 5).

Хотя все эти технологии геоинжиниринга имеют весьма неоднозначный эффект, но с каждым годом возрастает вероятность их одностороннего применения [3]. Поэтому в 2010 г. был озвучен призыв Конвенции ООН о биологическом разнообразии ввести мораторий (одобренный правительствами 196 стран) на всю геоинжиниринговую деятельность, пока не появится «глобальный, прозрачный и эффективный механизм контроля и регулирования».

В качестве следующего шага мировое сообщество должно решить, следует ли ему установить чѐткие и ясные правила управления и соответствующие ограничения в применении технологий геоинжиниринга [3] или же позволить отдельным игрокам (странам, корпорациям или физическим лицам) взять на себя лидерство, поставив всех остальных перед уже свершившимся фактом.

Ассамблея ООН по окружающей среде (UNEA) – мировой орган принятия решений по экологическим вопросам на высшем уровне – должна рассмотреть вопрос о том, следует ли инициировать процесс глобального изучения научного и управленческого аспектов геоинжиниринга [3]. С этой целью UNEA собирается осуществить общемировую оценку возможностей этих новых технологий, обеспечив всем странам мира единую платформу знаний.

Ученые Оксфордского университета предложили ряд добровольных принципов, которыми целесообразно руководствоваться странам и отдельным организациям при осуществлении исследований в области климатической геоинженерии.



Рис. 5. Катастрофически загрязненные реки

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

Принцип 1. Геоинженерия должна приносить явно выраженное общественное благо для всей человеческой цивилизации.

Принцип 2. Обязательное участие национальной и мировой общественности в принятии решений по тем или иным аспектам геоинженерии.

Принцип 3. Полное и всестороннее раскрытие геоинженерных исследований и открытая публикация получаемых результатов (прозрачность геоинженерии).

Принцип 4. Независимая оценка оказываемого воздействия на геосферы Земли и последствий от технологий геоинжиниринга.

Принцип 5. Управление геотехнологиями еще до их масштабного развертывания.

Эти принципы были одобрены UNEA и предложены мировому сообществу к практическому применению.

Список литературы

1. Stilgoe, J. Experiment Earth: Responsible innovation in geoengineering. – Routledge, 2016. – 222 p.
2. Геоинжиниринг вмешивается в планетарную эволюцию [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.pravda.ru/science/318402-geohacking
3. Как управлять геоинжинирингом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.project-syndicate.org/commentary/
4. Американцы начнут охлаждать Землю [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.msk.kp.ru/daily/26924.7/3970734
5. Миф геоинжиниринга [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vlast.kz/project-syndicate/25248-mif-geoinziniringa.html
6. Геофизическое оружие [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://spravochnick.ru/fizika/geofizicheskoe_oruzhie
7. Воробьев, А.Е. Человек и биосфера: глобальное изменение климата: Учебник. Ч.II. / А.Е. Воробьев, Л.А. Пучков. – М.: Изд-во РУДН, 2006. – 468 с.
8. Воробьев, А.Е. Человек и биосфера: глобальное изменение климата: Учебник. Ч.I. / А.Е. Воробьев, Л.А. Пучков. – М.: Изд-во РУДН, 2006. – 442 с.
9. Пучков, Л.А. Человек и биосфера: вхождение в техносферу: Учебник для вузов / Л.А. Пучков, А.Е. Воробьев. – М.: МГГУ, 2000. – 342 с.

Сведения об авторах

А.Е. Воробьев
SPIN-код: 3457-6870
Телефон: +7 (916) 081-10-43
Эл. почта: fogel_al@mail.ru

К.А. Воробьев
SPIN-код: 8425-7290
Телефон: +7 (977) 533-14-74
Эл. почта: k.vorobyev98@mail.ru

А.Н. Корчевский
SPIN-код: 1293-7006
Телефон: +380 (71) 331-98-16
Эл. почта: korcheval737@gmail.com

Статья поступила 07.03.2020 г.
© А.Е. Воробьев, А.Н. Корчевский, К.А. Воробьев, 2020



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

УДК 621.926

Д.А. Власенко /к.т.н./
ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» (Алчевск)

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РИФЛЕНЫХ ВАЛКОВ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ ДРОБИЛКАХ

Рассматривается возможность использования рифленых верхних валков в четырехвалковой дробилке, обоснованы конструктивные параметры и предложены рациональные размеры рифлей для различных марок углей и кокса с определенными фракционными характеристиками. Проведен анализ номинальных показателей дробилки ДЧГ 900×700 при использовании верхних валков с гладкой и рифленой поверхностью.

Ключевые слова: *агломерация, твердое топливо, четырехвалковая дробилка, валок, рифленый бандаж, размер валиков сетки.*

Постановка проблемы

Технологический процесс подготовки шихтовых компонентов в агломерационном производстве включает в себя несколько стадий: фракционную подготовку сырья, усреднение шихтовых составляющих по физико-механическим и химическим свойствам, увлажнение, смешивание и окускование (спекание). Обязательным критерием эффективности агломерационного процесса и получения готовой продукции высокого качества является подача на спекание шихты, однородной по гранулометрическому и химическому составу. При этом фракционный состав шихтовых материалов оказывает существенное влияние на их удельный расход в процессе спекания шихты, производительность процесса агломерации, качество готового агломерата и вредные выбросы в атмосферу [1…3].

Анализ последних исследований и публикаций

Влияние фракционного состава используемых в агломерационном производстве различных видов твердого топлива (коксовой и угольной мелочи, антрацита и других каменных углей), от которого существенно зависят основные технологические параметры процесса, исследованы многими учеными. Большинство результатов исследований сводятся к тому, что более высокие показатели эффективности введения твердого топлива в слой агломерационной шихты достигаются при условии использования фракции 0,5…3 мм [4,5]. Это обеспечивает более высокую температуру в слое, позволяет увеличить выход годного продукта, повысить удельную производительность, в том числе за счет увеличения скорости спекания, обусловленного удалением мелочи из топлива. Установлено, что уменьшение содержания фракции 0,5 мм в агломерационной шихте приводит к снижению расхода кокса в доменном процессе за счет повышения прочностных характеристик агломерата и росту производительности самих доменных печей.

Технологическим оборудованием, наиболее часто используемым при измельчении твердого топлива до фракции 0,5 мм в условиях агломерационного производства, являются четырехвалковые дробилки различных типов [6,7], зарекомендовавшие себя из всего разнообразия дробильных машин с наилучшей стороны при дроблении данного вида каменно-рудного сырья, но в то же время имеющие ряд недостатков [6…11]. Одними из основных недостатков всех валковых дробилок являются проскальзывание материала по поверхности бандажа в процессе измельчения, вследствие чего происходит переизмельчение материала и износ рабочей поверхности бандажа, и ограничение по максимальному размеру загружаемого в рабочее пространство сырья [11]. Это связано с тем, что при попадании крупных кусков не обеспечивается внедрение материала в рабочее пространство бандажей верхними валками, обусловленное углом захвата (углом между двумя касательными к поверхности валков в точках соприкосновения с дробимым материалом) [6]. Так, для условий использования гладких валков данный угол составляет в зависимости от материала, подвергаемого дроблению, приблизительно 16…24° [6,12]. При таких значениях отношение диаметров валка к диаметру куска дробимого материала при минимальном межвалковом зазоре составляет 1:20…1:10 [12].

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

Цель (задачи) исследования

Задачами данного исследования являются: анализ результатов, полученных с помощью математической модели, процесса контактного взаимодействия куска дробимого материала с рифленой поверхностью бандажей верхних валков четырехвалковой дробилки на этапе внедрения материала в ее рабочее пространство; обоснование рациональных конструктивных параметров сетки валков четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700 при измельчении различных видов твердого топлива с определенным фракционным составом при подготовке шихтовых компонентов в условиях производства железорудного агломерата на основании предложенных математических зависимостей.

Основной материал исследования

Четырехвалковые дробилки по конструкции представляют собой две пары валков, расположенных одна над другой, при этом их можно рассматривать как две двухвалковые дробилки, смонтированные в одном корпусе [6].

Рассматриваемый процесс измельчения материала в четырехвалковой дробилке включает в себя два основных технологических процесса: предварительное дробление в рабочем пространстве верхних валков и последующие измельчение между поверхностями нижних валков. Разрушение куска обеспечивается преимущественно за счет раздавливания между валками и истирания при скольжении кусков относительно поверхности бандажа. Однако измельчение истиранием требует значительно больших энергозатрат [13…15], чем раздавливание, и сопровождается существенным абразивным износом рабочей поверхности бандажа. При этом снижение влияния эффекта трения в процессе позволит повысить эффективность разрушения материала, а также снизить содержание мелкой фракции в дробленом продукте, что в совокупности положительно скажется на технико-экономических показателях работы дробильной машины и при этом повлияет на основные показатели агломерационного процесса в целом.

Эффект трения материала по поверхности бандажа в основном возникает при дроблении фракции, при которой не соблюдается условие захвата измельчаемого куска материала валками [6,7,12], или близкой к ней – в этом случае условие захвата может не обеспечиваться вследствие неправильности формы куска и физико-технологических условий взаимного контакта с рабочей поверхностью рабочего органа (влажность материла, содержание пылевидной фракции, состояние рабочей поверхности бандажа).

Для повышения эффективности процесса измельчения материала в данном типе дробильных машин используют верхние валки с рифленой или зубчатой поверхностью, а на нижнюю пару, как правило, устанавливают гладкие бандажи. За счет этого достигается более высокая степень измельчения материала в дробилке в целом и снижение износа рабочих органов. Наибольшее распространение получила конструкция верхних валков с рифленой поверхностью, которая обеспечивается тем, что на рабочую поверхность бандажа наносят сетку, образуемую продольными и поперечными выступающими валиками радиальной формы, наплавленными при помощи непрерывной электродуговой наплавки износостойким материалом [16]. Подобные конструктивные особенности четырехвалковых дробилок (рис. 1) применяются на агломерационных фабриках большинства металлургических предприятий при фракционной подготовке твердого топлива.

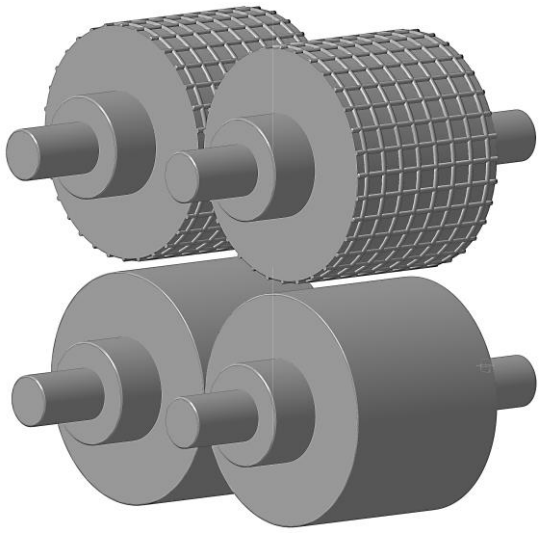


Рис. 1. Схема четырехвалковой дробилки с использованием верхних валков с рифленой поверхностью бандажей

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

Для проникновения измельчаемого материала 3 в рабочее пространство дробилки необходимо обеспечить его захват валками 1, который обеспечивается при выполнении следующего условия: сумма проекций сил трения материала по поверхности бандажа и валиков 2 на вертикальную ось должна быть больше суммы проекций выталкивающих сил – сил нормальной реакции от веса куска (N_1 и F_{mp1} – для гладких валков, F_{mp1}+F_{mp2} и N_1+ N_2 – для рифленых) (рис. 2).

Для гладких валков данное условие определяется значением угла захвата, регламентирующим максимально допустимый размер куска измельчаемого материала, загружаемого в рабочее пространство дробильной машины, и в зависимости от конструктивно-технологических параметров дробилки и фракционного состава исходного сырья определяется как:

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{R_б + 0{,}5b}{R_б + r_k}\right) \le \gamma_{mp}, \qquad (1)$$

где α_1 – угол захвата куска материала в рабочее пространство для гладких валков; $R_б$ – радиус рабочей поверхности бандажа валка; $r_к$ – условный радиус куска материала; b – межвалковый зазор (ширина выходной щели между валками); γ_{mp} – угол трения материала куска по рабочей поверхности бандажа, γ_{mp}=tanμ (где μ – коэффициент трения измельчаемого материала по материалу бандажа валка) [6,7,12].

При этом максимальный радиус измельчаемого куска определяется по зависимости [6]:

$$r_{k_{\max}} = \frac{R_б + 0{,}5b - R_б \cos\mu}{\cos\mu}. \qquad (2)$$

На рис. 3 представлен график зависимости максимального радиуса куска, дробимого в дробилке ДЧГ 900×700 [17] (радиус рабочей поверхности бандажа валка $R_б$=0,45 м; межвалковый зазор b=0,003 м), от коэффициента трения материала.

Из анализа графической зависимости (рис. 3) максимально допустимый размер фракции материала, который возможно подавать в четырехвалковую дробилку ДЧГ 900×700 с верхними гладкими валками, для антрацита (коэффициент трения по стали μ=0,2) составляет 0,021 м, для коксовой мелочи (μ=0,3) – 0,045 м, для кокса сухого тушения с коэффициентом μ=0,42 может достигать 0,08 м.

Однако в условиях производства агломерата используются каменные угли и кокс различной фракции, верхний предел которой может превышать предельно допустимые размеры. При этом в процессе работы бандаж изнашивается, и его поверхность периодически протачивают для обеспечения требуемого межвалкового зазора по всей его длине до допустимого диаметра 0,76 м, и в этих условиях максимальный размер куска уменьшается на 11…18 % в зависимости от вида твердого топлива. Поэтому, как оговаривалось ранее, с целью обеспечения возможности применения в производстве в качестве исходного сырья более крупную фракцию (в этом случае не требуется предварительное дробление материала и его классификация по крупности) на поверхность бандажей верхних валков наплавляют сетку.

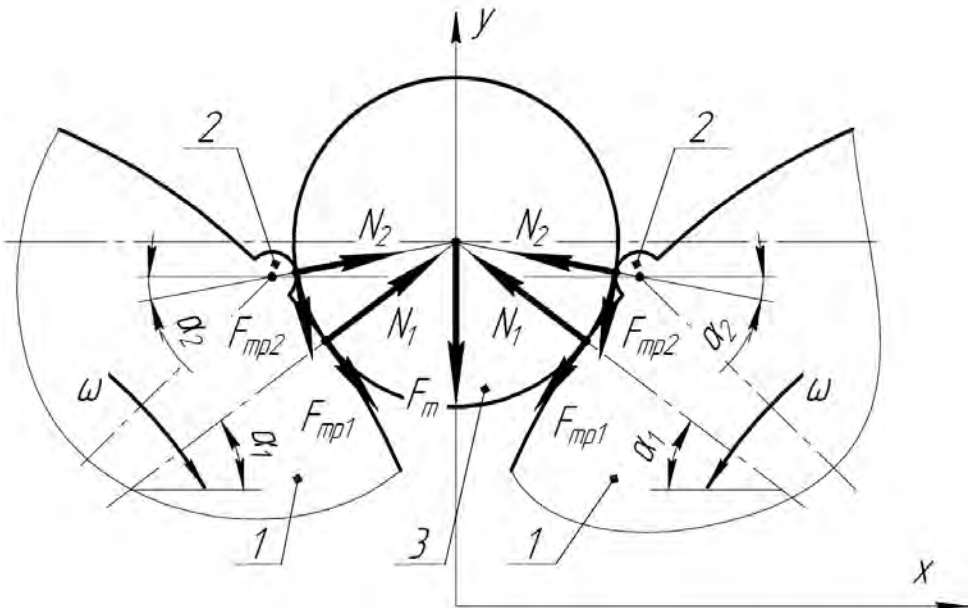


Рис. 2. Расчетная схема для определения параметров контактного взаимодействия измельчаемого материала с валками четырехвалковой дробилки

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

Однако в данное время в производственных условиях конструктивные параметры сетки (радиус валиков $r_в$ и угол между центрами окружностей соседних валиков сетки β_2) (рис. 4) подбирают эмпирически, а не обосновывая аналитическим путем.

С целью математического обоснования основных размеров сетки в работе [18] были предложены следующие зависимости, позволяющие определить:

– необходимый радиус валиков $r_в$:

$$r_в = \left(R_б + r_k\right)\cos\left(\alpha_2 - \arccos\left(\frac{R_б + 0{,}5b}{R_б + r_k}\right)\right) - r_k - 0{,}5\left(2R_б^2 - 2r_k^2 + \cos 2\alpha_2\left(2R_б^2 + 4R_б\left(b - r_k\right) + b^2\right) - 4R_б r_k + \sin 2\alpha_2\left(2R_б + b\right)\times \sqrt{\left(2r_k - b\right)\left(4R_b + b + 2r_k\right)}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где α_2 – угол, необходимый для обеспечения условия захвата куска материала (угол между вектором выталкивающей силы, возникающей при контактном взаимодействии материала с поверхностью валика, и перпендикуляром к вектору силы тяжести куска [18]):

$$\alpha_2 = \mu - \frac{\sin\alpha_1 - \sin\mu + \mu\left(\cos\mu - \cos\alpha_1\right)}{\sin\alpha_1}, \quad (4)$$

– угол между центрами окружностей соседних валиков сетки β_2:

$$\beta_2 = 2\arccos\left[\frac{R_б^2 - 0{,}5r_p^2 + r_к\left(R_б - r_p\right)}{R_б\left(R_б + r_к\right)}\right]. \quad (5)$$

На рис. 5 отображены графические зависимости радиуса валика и рекомендуемого угла между центрами окружностей соседних рифлей наплавляемой сетки на рабочей поверхности бандажа, необходимых для обеспечения условий захвата куска различного фракционного состава материала при дроблении отсевов кокса, кокса холодного тушения и углей марки АО и АС в дробилке ДЧГ 900×700.

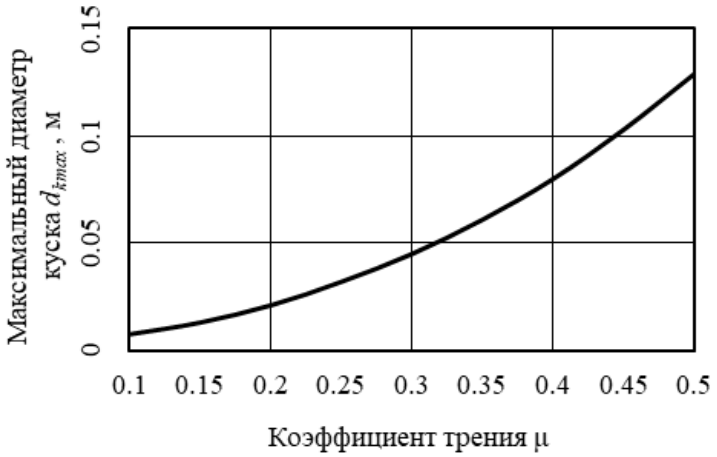


Рис. 3. График зависимости максимально допустимого диаметра куска измельчаемого материала в дробилке ДЧГ 900×700 от коэффициента трения

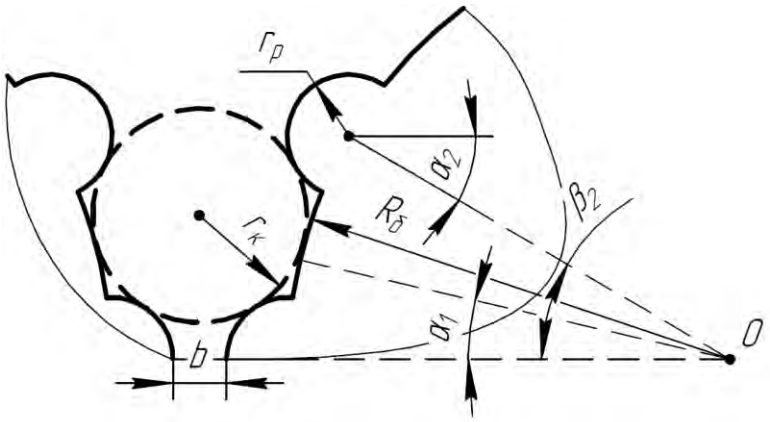
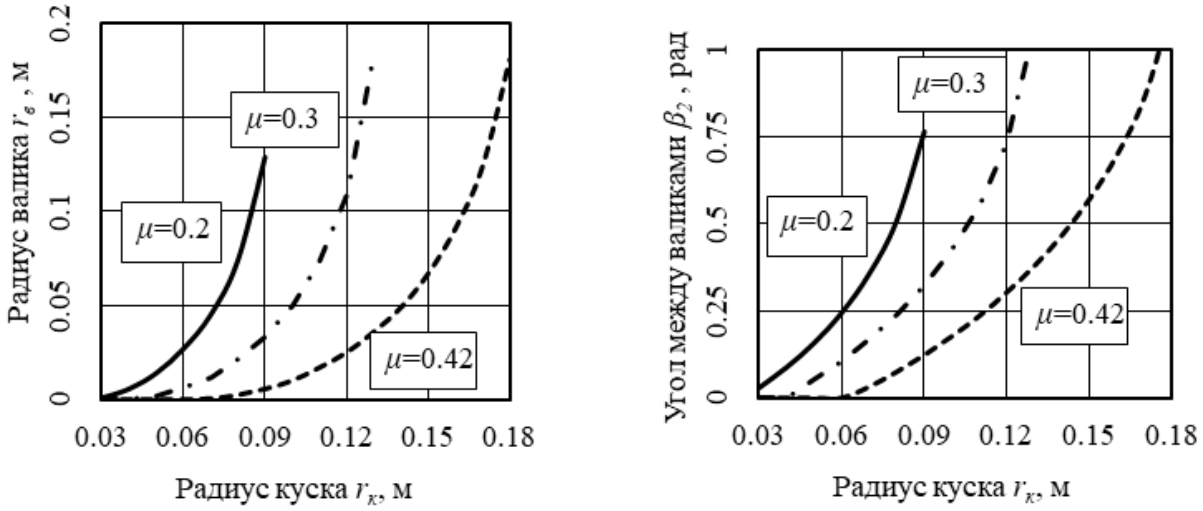


Рис. 4. Схема контактного взаимодействия измельчаемого материала с рифлеными валками четырехвалковой дробилки

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



а б

Рис. 5. Графические зависимости: *а* – радиуса валиков; *б* – угла между центрами соседних рифлей сетки на поверхности бандажа от радиуса куска дробимого материала

Для обеспечения условий технологического процесса производства агломерата, а также потребностей участка глиномялки доменного цеха в агломерационном цехе Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» на участке подготовки шихтовых материалов измельчению подвергаются следующие виды твердого топлива: угли марок АО и АС с фракционным составом 0…50 мм, коксовая мелочь (отсевы доменного производства) размерами 0…25 мм, кокс сухого тушения фракцией 60…140 мм.

Для повышения эффективности процесса фракционной подготовки сырья в данных технологических условиях на основании математических зависимостей (4), (5) предложены следующие размерные характеристики сетки верхних валков четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700 при следующих технологические параметрах процесса измельчения твердого топлива (табл. 1).

При этом номинальные показатели дробилки при условии использования бандажей верхних валков с гладкой и рифленой рабочей поверхностью в четырехвалковой дробилке в зависимости от максимально возможного размера валика сетки, ограниченного условием захвата куска материала нижними валками (максимальный радиус валика должен быть меньше максимального радиуса измельчаемого куска для нижних валков: $r_{в_{\max}} \le r_{k_{\max}}$), представлены в табл. 2.

Из анализа результатов, полученных с помощью зависимостей (1)…(5) и отображенных в табл. 2, видно, что при использовании рифленых верхних валков в дробилке ДЧГ 900×700 с аналитически обоснованными конструктивными параметрами наплавляемой сетки при помощи математической модели [18] реализована возможность использования в качестве исходного сырья твердого топлива с верхним пределом фракционного состава в 4,1…5,3 раза большего, чем при использовании верхних валков с гладкой поверхностью.

Табл.1. Технологические параметры процесса измельчения твердого топлива в четырехвалковой дробилке и рекомендуемые конструктивные параметры рифленых валков дробилки ДЧГ 900×700

Наименование параметра	Вид и фракция (мм) твердого топлива		
	Угли (…50)	Коксовая мелочь (…25)	Кокс сухого тушения (…140)
Коэффициент трения измельчаемого материала по стали μ	0,2	0,3	0,42
Требуемая фракция дробленого материала после помола, мм	0…3	0…3	0…5
Угол α_1, рад	0,309	0,206	0,487
Угол α_2, рад	0,16	0,222	0,021
Необходимый радиус валика сетки $r_в$, мм	3,9	-	14
Угол между центрами окружностей соседних валиков сетки β_2, рад	0,064	-	0,191

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

Табл. 2. Номинальные технологические показатели дробилки с использованием гладких и рифленых верхних валков в дробилке ДЧГ 900×700 при измельчении различных видов топлива

Наименование параметра	Вид твердого топлива		
	Угли	Коксовая мелочь	Кокс сухого тушения
Наибольший радиус дробимого куска для гладких валков $r_{k_{\max}}$, м	0,011	0,022	0,04
Наибольший радиус дробимого куска для рифленых валков (с максимально возможным размером валика $r_{в_{\max}}$) $r_{k_{\max}}$, м	0,058	0,089	0,14
Общая степень дробления для дробилок с гладкими верхними валками [6]	7,3	14,7	16
Общая степень дробления для дробилок с рифлеными верхними валками	38,7	59,3	55,6

При этом общая степень измельчения в дробилке в данных условиях процесса измельчения, которая существенно влияет на энергозатраты в процессе дробления различных материалов, возрастает в 3,5…5,3 раза.

Таким образом, для дальнейших исследований перспективным направлением является метод комбинационного синтеза дробилок с использованием верхних рифленых валков, направленный на реализацию сочетания достоинств в одном устройстве дробильных машин различных типов. В настоящее время такие работы проводятся в Донбасском государственном техническом университете с привязкой к условиям агломерационного цеха Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» (бывшее ПАО «АМК»).

Выводы

Проведен анализ результатов, полученных с помощью математической модели процесса контактного взаимодействия куска дробимого материала с рифленой поверхностью бандажей верхних валков четырехвалковой дробилки на этапе внедрения материала в ее рабочее пространство, а также обоснованы рациональные конструкционно-технологические параметры сетки валков четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700 при измельчении различных видов твердого топлива с определенным фракционным составом при подготовке шихтовых компонентов в условиях производства железорудного агломерата на основании полученных математических зависимостей.

Проведен сравнительный анализ номинальных показателей дробилки ДЧГ 900×700 в условиях использования бандажей верхних валков с гладкой и рифленой рабочей поверхностью в четырехвалковой дробилке в зависимости от максимально возможного размера валика сетки.

Предложены конструктивно-технологические параметры процесса измельчения различных видов твердого топлива в четырехвалковой дробилке и рекомендуемые конструктивные параметры рифленых валков дробилки ДЧГ 900×700.

Перспективным и в то же время необходимым направлением развития данных исследований является проверка адекватности математической модели процесса контактного взаимодействия куска дробимого материала с рифленой поверхностью бандажей верхних валков с помощью лабораторных, а затем и промышленных экспериментов (в условиях агломерационного цеха Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис»), что в свою очередь позволит использовать полученные зависимости при обосновании технико-эксплуатационных характеристик четырехвалковых дробилок с конкретными конструктивными параметрами рифленых верхних валков при измельчении и дроблении различных видов каменно-рудного сырья.

Список литературы

1. Treatise on Process Metallurgy, Vol.3: Industrial Processes / Editor-in-Chief S. Seetharaman. – Elsevier, 2014. – 1751 p.
2. Коротич, В.И. Агломерация рудных материалов. Научное издание / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Т.Н. Бездежский. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ», 2003. – 400 с.
3. Fernández-González, D. Iron Ore Sintering: Raw Materials and Granulation / D. Fernández-González [et al.] // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2017. – Issue 1. Vol.38. – P. 36-46.
4. Ni, Wenjie. Effects of Fuel Type and Operation Parameters on Combustion and NO_x Emission of the Iron Ore Sintering Process / Wenjie Ni

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

[et al.] // Energies. – 2019. – Issue 2. Vol.12. – P. 1-21.
5. Одинцов, А.А. Повышение качества железорудного агломерата на основе разработки ресурсосберегающей технологии подготовки твердого топлива: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.16.02 / Одинцов Антон Александрович. – Новокузнецк: ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», 2015. – 23 с.
6. Оборудование для переработки сыпучих материалов: учебное пособие / В.Я. Борщев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2006. – 208 с.
7. Subba Rao, D.V. Minerals and Coal Process Calculations. – London: Taylor & Francis Group, 2016. – 354 p.
8. Egbe, E.A.P. Design, Fabrication and Testing of a Double Roll Crusher / E.A.P. Egbe, O.A. Olugboji // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). – Seventh Sense Research Group, 2016. – Issue 11. Vol.35. – P. 511-515.
9. Comparison of grinding characteristics in high-pressure grinding roller (HPGR) and cone crusher (CC) / L. Lei [et al.] // Physicochemical Problems of Mineral Processing. – 2017. – No.53 (2). – P. 1009-1022.
10. An Improved High-Pressure Roll Crusher Model for Tungsten and Tantalum Ores / H. Anticoi [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2019. – Issue 6. Vol.8. – P. 5476-5489.
11. Власенко, Д.А. Комплексный анализ особенностей эксплуатации дробильно-измельчительного оборудования в агломерационном производстве / Инновационные перспективы Донбасса. Т.3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов, г. Донецк, 21-23 мая 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 150-154.
12. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. I / Под ред. Г.М. Островского. – С.-Пб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. – 848 с.
13. Заднепровский, Р.П. Об энергоемкости разрушения тел с учетом их физического состояния и режима нагружения / Вестник Тамбовского университета, 2016. – № 3. – С. 826-829 (Серия: естественные и технические науки).
14. Захаров, Е.В. Влияние знакопеременных температурных воздействий на энергоемкость процесса дробления горных пород: дис. … канд. техн. наук: 25.00.20 / Захаров Евгений Васильевич. – Якутск: Учреждение Российской академии наук Институте горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН, 2012. – 120 с.
15. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry / K. Holmberg [et al.] // Tribology International. – 2017. – Issue 115. – P. 116-139.
16. Пат. 188107 РФ, МПК B02C 4/30. Валок четырехвалковой дробилки / А.П. Жильцов [и др.]. – № 2018134232; заявл. 27.09.2018; опубл. 28.03.2019; бюл. № 10.
17. ПТИМ 229-ОА-030-7-2018. Техническое обслуживание и ремонт дробильного оборудования участка шихтоподготовки агломерационного цеха. – Введ. 2018.29.01. – Алчевск: Филиал № 12 ЗАО «Внешторгсервис», 2018. – 29 с.
18. Власенко, Д.А. Некоторые способы повышения эффективности процессов фракционной подготовки шихтовых материалов в агломерационном производстве // Современные материалы, техника и технология. Сборник научных статей 9-й Международной научно-практической конференции, 28 декабря 2019 г. – Курск: ЮЗГУ, 2019. – Т.1. – С.94-99.

D.A. Vlasenko /Cand. Sci. (Eng.)/
Donbas State Technical University (Alchevsk)

SUBSTANTIATION OF DESIGN PARAMETERS AND PROSPECTS FOR USING FLUTED ROLLS IN FOUR-ROLL CRUSHERS

Background. *Crushing solid fuel in the agglomeration process is quite energy-intensive. At the same time, the physical and technical parameters of the finished product are subject to high requirements, which determine the importance of this research and improvement of these processes to reduce energy consumption and improve the quality of the crushing process.*
Materials and/or methods*. The aim of this paper is the substantiation of constructive-technological parameters of four-roll crusher and enhancing its effectiveness in the crushing of various types of solid fuel on the basis of the proposed mathematical model of the process of contact interaction of the piece of crushable material with fluted surface of upper roll bands of four-roll crusher.*
Results*. The analysis is carried out of the results obtained using the mathematical model of the*

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

process of contact interaction of the piece of crushable material with a fluted surface of upper roll bands of four-roll crusher at the stage of introduction of the material in its workspace.. A comparative analysis of the nominal parameters of the crusher under the conditions of using upper roll bands with a smooth and fluted working surface in a four-roll crusher, depending on the maximum possible size of the roller is carried out. The design and technical parameters of the process of grinding various types of solid fuel in a four-roll crusher and the recommended design parameters of the fluted rolls of the crusher are proposed.

***Conclusion**. The results of the research can be used to justify the main design parameters of an industrial grinding plant to confirm the adequacy of the mathematical model of the process of contact interaction of a piece of crushed material with the fluted surface of the upper roll bands.*

***Keywords:** agglomeration, solid fuel, four-roll crusher, roll, fluted band, rollers size.*

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

Статья поступила 25.02.2020 г.
© Д.А. Власенко, 2020
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько



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

УДК 621.926.47-868

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВИБРОЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКИ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ КАМЕРЫ ДРОБЛЕНИЯ

Выполнены экспериментальные исследования физической модели виброщековой дробилки с горизонтальным расположением камеры дробления. Разработана математическая модель для моделирования рабочего процесса виброщековой дробилки, оценена ее адекватность.

Ключевые слова: *математическая модель, динамика, виброщековая дробилка, горизонтальная камера.*

Постановка проблемы

Основной проблемой при проектировании виброщековых дробилок является необходимость прогнозировать основные характеристики динамических процессов в рабочих режимах эксплуатации [1…5]. Решение данной проблемы возможно за счет разработки математических моделей, позволяющих исследовать процессы запуска, остановки и холостого хода виброщековой дробилки и выбирать ее рациональные параметры.

Анализ последних исследований и публикаций

Разработанные математические модели и рекомендации [1…5] относятся к виброщековым дробилкам с вертикальной и наклонной камерами дробления, в которых дробимый материал перемещается под действием собственного веса. Эти результаты не могут быть непосредственно использованы для дробилок с горизонтальной камерой дробления, в которых перемещение материала в камере дробления происходит с постоянной скоростью с помощью скребкового конвейера.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является разработка математической модели рабочего процесса виброщековой дробилки с горизонтальным расположением камеры дробления и оценка ее адекватности путем сравнения с результатами экспериментальных исследований физической модели.

Основной материал исследования

Экспериментальные исследования проводились на физической модели виброщековой дробилки с горизонтальным расположением камеры дробления, разработанной и изготовленной АО «Механобр-техноген» (г. Санкт-Петербург) в масштабе примерно 1:6. Методика исследований предусматривала определение динамических характеристик и собственных частот дробилки, регистрацию динамических процессов в узлах дробилки в переходных режимах пуска и стопорения, на холостом ходу и при дроблении кусков породы различной крепости и размеров.

Физическая модель виброщековой дробилки (рис. 1) состоит из дробящего устройства и скребкового конвейера, которые объединены в дробяще-транспортирующий блок (ДТБ).

ДТБ установлен на сварной раме 1 на четырех упругих опорах 2. На раме 1 жестко закреплены электродвигатель 3 привода вибратора и электродвигатель 4 с редуктором 5 привода скребкового конвейера.

Связь электродвигателя 3 с вибратором 6 и редуктора 5 с ведущей звездочкой 7 скребкового конвейера осуществляется при помощи упругих муфт 8 и 9, так как в процессе работы ДТБ совершает колебания относительно рамы 1.

Дробящее устройство состоит из верхней активной щеки 10 и нижней реактивной щеки 11, образующих горизонтальную камеру дробления. Верхняя щека 10 соединена с ДТБ при помощи торсиона, представляющего собой пакет упругих стальных пластин 12, и приводится в колебательное движение дебалансным вибратором 6.

В табл. 1 приведены основные параметры физической модели.

В соответствии с поставленными задачами в процессе экспериментальных исследований измерялись и регистрировались следующие величины: угловые перемещения φ_1 верхней щеки относительно нижней щеки; горизонтальные S_2 и вертикальные S_3 и S_4 перемещения характерных точек нижней щеки; мгновенные значения мощности электродвигателей вибратора $P_в$ и

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

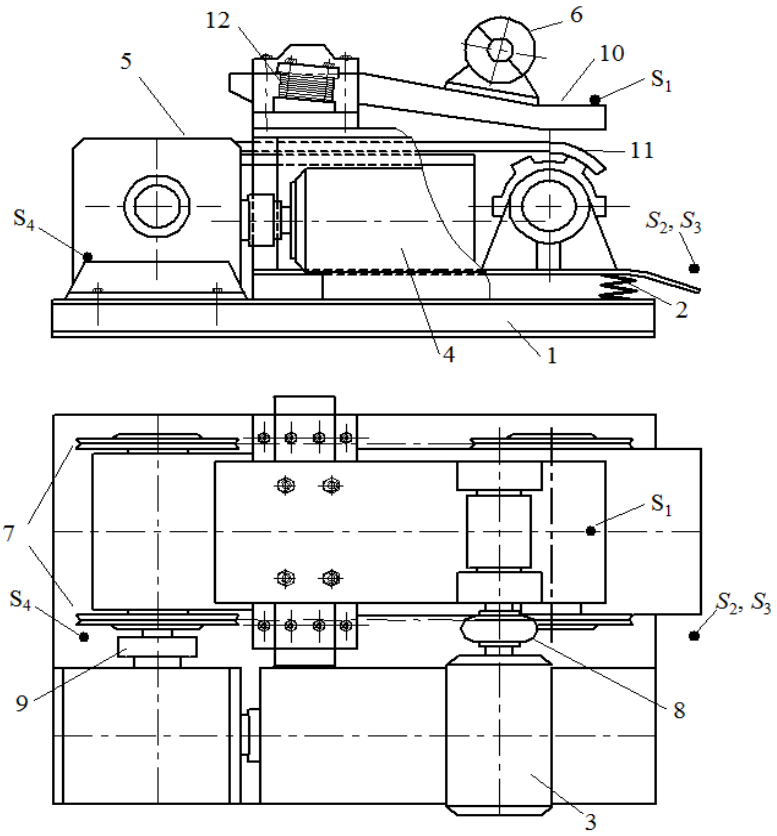


Рис. 1. Физическая модель виброщековой дробилки:
1 – рама; *2* – опоры; *3, 4* – электродвигатели; *5* – редуктор; *6* – вибратор; *7* – ведущая звездочка; *8, 9* – упругие муфты; *10* – активная щека; *11* – реактивная щека; *12* – пластины

конвейера P_m; отметчик углового положения дебалансного вибратора. Перемещения измерялись при помощи тензобалочек S_1, S_2, S_3 и S_4, расположение которых показано на рис. 1. Кроме указанных величин измерялись размеры и масса дробимых кусков породы, их крепость по шкале М.М. Протодъяконова, а также гранулометрический состав продукта. В процессе экспериментальных исследований определены упругие характеристики торсиона и упругих опор ДТБ. Установлено, что в первом приближении упругие элементы модели могут рассматриваться как линейные с коэффициентами жесткости для торсиона $C_к$=4,0 кН·м, для одной опоры C_{oi}=64,3 кН/м. Для определения собственных частот парциальных подсистем производилось осциллографирование свободных затухающих колебаний верхней щеки и ДТБ. Частота свободных колебаний верхней щеки составляет 13…13,5 Гц, частота свободных вертикальных колебаний ДТБ составляет примерно 7,1 Гц, а продольных колебаний – 3,4 Гц.

Экспериментальные исследования переходных режимов пуска и остановки дробилки показали, что в этих режимах амплитуды колебаний основных элементов существенно увеличиваются по сравнению с холостым ходом. Максимальные значения амплитуды колебаний верхней щеки достигают при выбеге вибратора 0,047 рад. (11,8 мм на тензобалочке S_1), и объясняется явлением прохождения системы через резонанс на частоте примерно 13 Гц. При холостом ходе дробилки амплитуды колебаний верхней щеки составляют 0,018 рад. (4,8 мм на тензобалочке S_1), вертикальные колебания разгрузочного лотка имеют амплитуду 0,8…1,0 мм (тензобалочка S_3), а продольные колебания – 0,3…0,35 мм (тензобалочка S_2).

Табл. 1. Основные параметры физической модели виброщековой дробилки

№	Наименование показателей	Значение показателя
1	Производительность, м^3/час	до 1
2	Крупность питания, мм	до 50
3	Размер приемного отверстия, мм	60×200
4	Ширина разгрузочной щели, мм	10
5	Угол захвата, град.	15
6	Частота колебаний, Гц	24
7	Номинальная мощность электродвигателей, кВт:	
	– вибратора	1,1
	– конвейера	1,1

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

В процессе экспериментов установлено наибольшее значение крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова f=11…12 породы, которая может быть раздроблена без расклинивания верхней щеки, а также наибольшая возможная производительность около 250 кг/час для пород крепостью f=5, что примерно в 4 раза меньше теоретической производительности, определяемой по номинальной площади выходной щели и скорости цепи конвейера. Дальнейшее повышение производительности питателя приводит к расклиниванию щеки дробилки.

Удельные энергозатраты при дроблении находятся в диапазоне 0,7…1,5 кВт·ч/т. Гранулометрический состав продукта характеризуется большим содержанием кусков породы, размеры которых превышают номинальную ширину разгрузочной щели (10 мм). Так, выход класса +13 мм в продукте достигает 66 %. Это объясняется существенным увеличением среднего размера выходной щели при виброударном дроблении за счет отклонения активной щеки вверх (явление увода [6]).

Наибольшие перемещения и нагрузки формируются в режимах дробления породы. Максимальное отклонение верхней щеки достигает 0,112 рад., а максимальная амплитуда – 0,075 рад. (соответственно 34 мм и 23 мм на тензобалочке S_1). Максимальные амплитуды колебаний разгрузочного лотка ДТБ достигают в вертикальном направлении 7,9 мм, а в горизонтальном (продольном) – 1,25 мм. Максимальное значение мощности электродвигателя вибратора – 790 Вт, а транспортирующего устройства – 350 Вт.

Полученные результаты использованы для оценки адекватности разработанной математической модели виброщековой дробилки с горизонтальным расположением камеры дробления.

При разработке расчетной схемы и математической модели приняты следующие допущения:

– все упругие и диссипативные связи рассматриваются как линейные;

– не учитываются радиальные усилия, возникающие в упругих муфтах;

– центр масс системы не изменяет своего положения в системе координат, связанной с дробильно-транспортирующим блоком;

– нижняя и верхняя щеки абсолютно жесткие;

– не учитываются колебания в поперечном направлении, то есть рассматривается плоская задача;

– не учитываются динамические свойства электродвигателя вибратора.

Расчетная динамическая схема дробилки представлена на рис. 2.

На ее основе разработана математическая модель для исследования режимов пуска, холостого хода, останова и заклинивания щеки абсолютно жестким недробимым предметом. Приняты следующие обобщенные координаты φ_1, φ_2 – углы поворота, соответственно, верхней щеки относительно нижней и нижней щеки относительно неподвижной системы координат; x, y – горизонтальные и вертикальные перемещения центра масс O_2 нижней щеки. На рисунке O_1 – центр масс верхней щеки с вибратором.

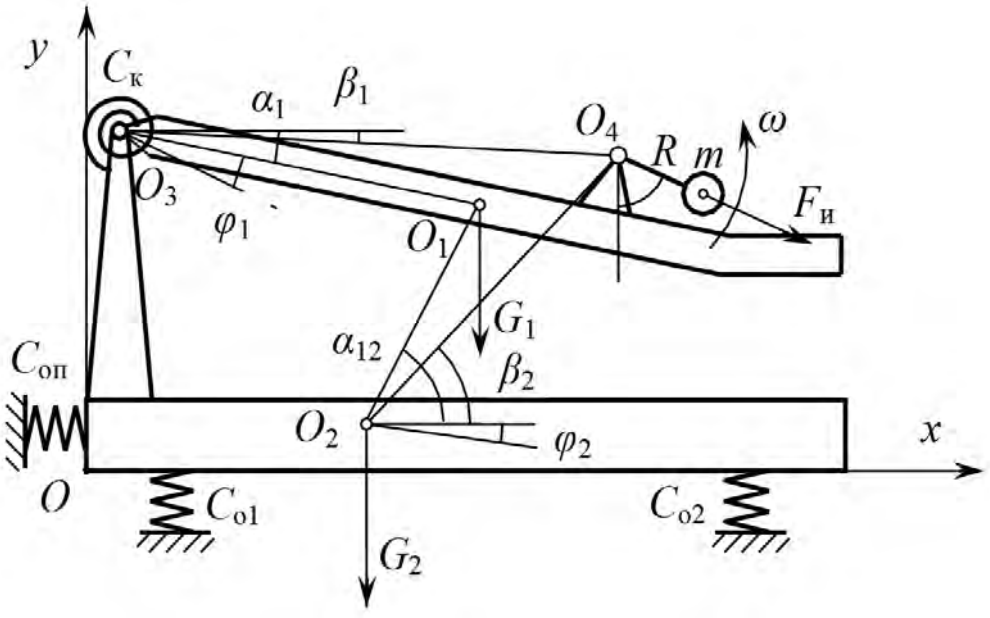


Рис. 2. Расчетная динамическая схема дробилки

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

Введем обозначения $O_1O_3=l_1$, $O_3O_4=l_2$, $O_2O_4=l_3$, $O_1O_2=l_{12}$. Используя теорему Кѐнига, получим выражение для кинетической энергии системы:

$$T = 0{,}5\left(I_{1щ}\dot{\varphi}_1^2 + I_{02}\dot{\varphi}_2^2 + M(\dot{x}^2+\dot{y}^2) + 2I_{12}\dot{\varphi}_1\dot{\varphi}_2 + \right.$$
$$\left. + 2A_{1x}\dot{\varphi}_1\dot{x} + 2A_{2x}\dot{\varphi}_2\dot{x} + 2A_{1y}\dot{\varphi}_1\dot{y} + 2A_{2y}\dot{\varphi}_2\dot{y}\right), \quad (1)$$

где $I_{1щ}$ – массовый момент инерции верхней щеки относительно оси O_3; I_{02} – массовый момент инерции всего дробильно-транспортирующего блока относительно оси O_2;

$$I_{12} = I_1 + m_1 l_1 l_{12}\cos(\alpha_1 - \alpha_{12}),$$

$$A_{1x} = m_1 l_1 \sin\alpha_1;\ A_{2x} = m_1 l_{12}\sin\alpha_{12},$$

$$A_{1y} = m_1 l_1 \cos\alpha_1;\ A_{2y} = m_1 l_{12}\cos\alpha_{12},$$

где $M=m_1+m_2$ – масса ДТБ; m_1, m_2 – масса, соответственно, верхней и нижней щек.

Следует отметить, что при определении инерционных характеристик дробилки должна учитываться масса расположенной на нижней щеке породы.

Потенциальная энергия системы записывается в виде:

$$П = 0{,}5\left(C_к\varphi_1^2 + C_{on}x^2 + \sum_{i=1}^{n} C_{oi}y^2 + \sum_{i=1}^{n} C_{oi}x_{oi}^2\varphi_2^2\right), \quad (2)$$

где $C_к$ – коэффициент крутильной жесткости упругой связи между верхней и нижней щеками; C_{oi} – коэффициент жесткости i-й опоры в вертикальном направлении; C_{on} – коэффициент жесткости опор в продольном направлении; x_{oi} – координата опоры в системе координат с центром в точке O_2; n – количество опор.

Диссипативная функция системы имеет вид:

$$Ф = 0{,}5\left(\beta_к\dot{\varphi}_1^2 + \beta_{on}\dot{x}^2 + \sum_{i=1}^{n}\beta_{oi}\dot{y}^2 + \sum_{i=1}^{n}\beta_{oi}x_{oi}^2\dot{\varphi}_2^2\right), \quad (3)$$

где $\beta_к$ – коэффициент сопротивления упругой связи между верхней и нижней щеками; β_{oi} – коэффициент сопротивления i-й опоры; β_{on} – коэффициент сопротивления опор в продольном направлении.

На систему действуют внешние силы веса G_1 и G_2 верхней и нижней щек, а также сила инерции F_u дебалансного вибратора:

$$F_u=\omega^2 mR. \quad (4)$$

Обобщенные силы, действующие на систему:

$$Q_x=F_u\sin\omega t,$$

$$Q_y=F_u\cos\omega t - G_1 - G_2,$$

$$Q_{\varphi 1}=F_u l_2\cos(\omega t+\beta_1) - G_1 l_1\sin\alpha_1,$$

$$Q_{\varphi 2}=F_u l_3\cos(\omega t+\beta_2) - G_1 l_1\cos\alpha_1. \quad (5)$$

Используя (1)…(5), с помощью уравнения Лагранжа II рода получим систему дифференциальных уравнений динамики дробилки:

$$\begin{cases} I_{1щ}\ddot{\varphi}_1 + I_{12}\ddot{\varphi}_2 + A_{1x}\ddot{x} + A_{1y}\ddot{y} + \beta_к\dot{\varphi}_1 + C_к\varphi_1 = \\ = F_u l_2\cos(\omega t+\beta_1) + G_1 l_1\sin\alpha_1; \\ I_{12}\ddot{\varphi}_1 + I_{02}\ddot{\varphi}_2 + A_{2x}\ddot{x} + A_{2y}\ddot{y} + \beta_2\dot{\varphi}_2 + C_2\varphi_2 = \\ = F_u l_3\cos(\omega t+\beta_2) + G_1 l_{12}\sin\alpha_{12}; \\ A_{1x}\ddot{\varphi}_1 + A_{2x}\ddot{\varphi}_2 + M\ddot{x} + \beta_{on}\dot{x} + C_{on}x = F_u\sin(\omega t); \\ A_{1y}\ddot{\varphi}_1 + A_{2y}\ddot{\varphi}_2 + M\ddot{y} + \beta_y\dot{y} + C_y y = \\ = -F_u\cos(\omega t) - G_1 - G_2. \end{cases} \quad (6)$$

где

$$C_y = \sum_{i=1}^{n} C_{oi},\quad C_2 = \sum_{i=1}^{n} C_{oi}x_{oi}^2,$$

$$\beta_y = \sum_{i=1}^{n}\beta_{oi},\quad \beta_2 = \sum_{i=1}^{n}\beta_{oi}x_{oi}^2.$$

Для моделирования процессов запуска и остановки задавался линейный закон изменения угловой скорости вибратора ω. Для численного интегрирования система (6) приводится к нормальному виду.

В случае попадания в камеру дробления абсолютно жесткого предмета, перемещающегося вдоль камеры со скоростью движения цепи скребкового конвейера, динамическая система становится виброударной. Для моделирования процесса заклинивания верхней щеки недробимым предметом принято допущение, что в момент удара скорость взаимодействующих тел изменяется мгновенно. Для обозначения скорости тел до удара используем индекс «*д*», а после удара – индекс «*п*».

Угловые скорости верхней щеки до и после удара согласно гипотезе Ньютона связаны соотношением:

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

$$\omega_{1n}=-K_2\omega_{1\partial}, \quad (7)$$

где K_2 – коэффициент восстановления скорости при ударе.

Угловая скорость нижней щеки после удара определяется исходя из закона сохранения момента количества движения:

$$\omega_{2n}=\omega_{2\partial}+\frac{I_1\omega_{1\partial}}{I_1+I_2}(1+K_2), \quad (8)$$

где I_1, I_2 – центральные массовые моменты инерции верхней и нижней щек.

Значения скоростей нижней щеки после удара определяются из условия сохранения количества движения:

$$\dot{y}_n=\dot{y}_\partial-\frac{m_1(1+K_2)}{m_1+m_2}\times$$
$$\times(l_1\cos\alpha_1-\frac{I_1l_{12}\cos\alpha_{12}}{I_1+I_2})\omega_{1\partial},$$

$$\dot{x}_n=\dot{x}_\partial-\frac{m_1(1+K_2)}{m_1+m_2}\times$$
$$\times(l_1\sin\alpha_1-\frac{I_1l_{12}\sin\alpha_{12}}{I_1+I_2})\omega_{1\partial}. \quad (9)$$

В процессе численного интегрирования системы уравнений (6) момент времени удара определялся путем проверки условия:

$$H_{12}(t)>H_n, \quad (10)$$

где $H_{12}(t)$ – мгновенное значение высоты камеры в точке расположения недробимого предмета высотой H_n.

При нарушении условия (10) по выражениям (8) и (9) определяются значения скоростей после удара, которые служат начальными условиями для дальнейшего интегрирования системы (6).

Для оценки адекватности разработанной математической модели выполнено сравнение результатов натурного и вычислительного экспериментов в режиме колебаний без нагрузки (холостой ход). Установлено, что амплитуды угловых колебаний верхней щеки, полученные при компьютерном моделировании, отличаются от соответствующих экспериментальных значений на 18 %, амплитуды горизонтальных и вертикальных колебаний нижней щеки в точке установки тензобалочек S_2, S_3 (рис. 1) отличаются от экспериментальных данных соответственно на 23 и 20 %. Следовательно, разработанная модель в основном адекватно описывает динамические процессы дробилки.

Выводы

Выполненные экспериментальные исследования физической модели вибрационной щековой дробилки с горизонтальным расположением камеры дробления доказали работоспособность такой конструктивной схемы дробилки и послужили основой для разработки математической модели.

Разработанная математическая модель виброщековой дробилки с горизонтальным расположением камеры дробления обеспечивает корректное компьютерное моделирование процессов запуска, остановки, холостого хода и заклинивания щеки недробимым предметом. Использование математической модели на стадии проектирования позволит прогнозировать основные характеристики динамических процессов в режимах холостого хода, пуска, останова, заклинивания верхней щеки недробимым предметом и выбирать рациональные параметры вибрационной щековой дробилки с горизонтальным расположением камеры дробления.

Список литературы

1. Шишкин, Е.В. Динамика вибрационной щековой дробилки с учетом влияния технологической нагрузки / Е.В. Шишкин, А.Н. Сафронов // Обогащение руд. – 2016. – №6(36). – С. 39-43.
2. Shishkin, E.V. Dynamic analysis of a vibratory jaw crusher with inclined crushing chamber // Proceedings of International Conference on Mechanics – Seventh Polyakhov's Reading, 2-6 February 2015, Saint Petersburg. – St. Petersburg State University, IEEE, 2015. – Doi: 10.1109/POLYAKHOV.2015.7106775.
3. Шишкин, Е.В. Безударные колебания вибрационной щековой дробилки с наклонной камерой дробления / Е.В. Шишкин, О.А. Пугина, С.В. Казаков // Фундаментальные основы механики. – 2016. – №1. – С. 55-59.
4. Сафронов, А.Н. Реализация вибрационных эффектов в новой схеме щековой дробилки / А.Н. Сафронов, С.В. Казаков // Материалы международной конференции «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья» (Плаксинские чтения-2016), Санкт-Петербург, 26-30 сентября 2016. – М: АО «ИД «Руда и Металлы», 2016. – С. 63-65.
5. Panovko, G. On oscillations of a vibratory jaw crusher with asymmetric interaction of the

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

jaws with the processed medium / G. Panovko, A. Shokhin, I. Lyan // Vibroengineering PROCEDIA. – 2019. – Vol.25. – P. 83-88.
6. Fidlin, A. On the averaging in strongly damped systems: The general approach and its application to asymptotic analysis of the Sommerfeld's effect / A. Fidlin, O. Drozdetskaya // Book of Abstracts of IUTAM Symposium on Analytical Methods in Nonlinear Dynamics, Frankfurt, Germany, July 6-9, 2015. – Frankfurt: Technische Universität Darmstadt, 2015. – P. 19-21.

V.P. Kondrakhin /Dr. Sci. (Eng.)/, V.S. Novoseltsev
Donetsk National Technical University (Donetsk)

MODELLING OF THE WORKING PROCESS OF THE VIBRO-JAW CRUSHER WITH A HORIZONTAL CRUSHING CHAMBER LOCATION

Background. *The main problem in the design of vibro-jaw crushers is the need to predict the main characteristics of dynamic processes in operating modes. The solution to this problem is possible through the development of mathematical models that allow simulating the processes of starting, stopping, idling and the process of jamming the jaws with an unbroken object. Similar models have been developed for vibro-jaw crushers with vertical and inclined crushing chambers. However, these models cannot be used for the design of advanced vibro-jaw crushers with a horizontal crushing chamber.*
Materials and/or methods*. When developing the design scheme and mathematical model, the assumption of linearity of the elastic and dissipative ties, absolute rigidity of the upper and lower jaws were adopted, oscillations in one plane considered and not taken into account dynamic properties of the motor unbalanced vibrator. Lagrange equations of the second kind were used to create differential equations of motion of a system with 4 degrees of freedom. Experimental studies were carried out on a physical model of a vibrating screen crusher with a horizontal location of the crushing chamber. The research method provided for the determination of dynamic characteristics and natural frequencies of the crusher*, *registration of dynamic processes in crusher units in the transition modes of starting and stopping, at idle and when crushing pieces of rock of different strength and sizes.*
Results. *For the first time, a calculated dynamic scheme and a mathematical model of the dynamics of a vibro-jaw crusher with a horizontal location of the crushing chamber developed taking into account the vibro-impact nature of the interaction of the jaws with absolutely rigid non-crushable obstacles. The error in modelling dynamic processes in the crusher does not exceed 23 %.*
Conclusion. *The developed mathematical model of a vibrating jaw crusher with a horizontal location of the crushing chamber provides a correct computer simulation of the processes of starting, stopping, idling and jamming the jaw with an unbroken object. Using a mathematical model at the design stage will allow predicting the main characteristics of dynamic processes and choose rational parameters of a vibro-jaw crusher with a horizontal location of the crushing chamber.*

Keywords: *mathematical model, dynamics, vibro-jaw crusher, horizontal chamber.*

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

В.С. Новосельцев
Телефон: +380 (71) 340-22-76
Эл. почта: vetaln.n@gmail.com

Статья поступила 07.03.2020 г.
© В.П. Кондрахин, В.С. Новосельцев, 2020
Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев

УДК 621.313

В.И. Калашников /к.т.н./, В.Г. Черников, А.А. Горбунов
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБОВ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Приведен сравнительный анализ способов частотного регулирования/управления асинхронного короткозамкнутого двигателя без датчика скорости: U/f с линейной характеристикой, U/f с контролем тока намагничивания и векторное регулирование без датчика скорости. Показана целесообразность применения векторного регулирования без датчика скорости в диапазоне 10:1.

Ключевые слова: *частотное регулирование, бездатчиковое управление, регулируемый электропривод, механические характеристики.*

Постановка проблемы

Частотно-регулируемый электропривод в настоящее время является основным типом регулируемого привода во всех отраслях промышленности. Различают скалярное и векторное регулирования скорости асинхронного привода. При скалярном управлении формируются гармонические токи двигателя. Векторное регулирование – это метод управления электрическими машинами переменного тока с вращающимся магнитным полем, формирующий гармонические токи (напряжения) фаз и обеспечивающий управление магнитным потоком ротора (моментом на валу двигателя). На практике наиболее часто применяются частотно-регулируемые асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором без датчика скорости.

Особенностью асинхронного двигателя является то, что его параметры одной и той же мощности, одного и того же производителя существенно отличаются [1]. Это обстоятельство требует автоматического определения параметров привода конкретного двигателя. Для выбора системы регулирования представляет интерес сравнить различные способы частотного регулирования/управления двигателя и показать различие в определении параметров двигателя по его паспортным данным и по результатам автоматической настройки.

Анализ последних исследований и публикаций

В технической литературе достаточно подробно рассмотрены способы частотного регулирования асинхронного привода без датчика скорости [2…4], однако отсутствует анализ механических характеристик асинхронного привода для одного и того же двигателя при различных способах частотного управления в широком диапазоне изменения скорости. Также отсутствует количественный анализ различия в определении параметров конкретного двигателя по паспортным данным и при самонастройке.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа механических характеристик и зависимости тока статора от момента двигателя при различных способах регулирования/управления скорости, а также анализ отклонения параметров двигателя, определенных по паспортным данным и в результате автоматической настройки.

Основной материал исследования

Современный электропривод с микропроцессорной системой регулирования позволяет, во-первых, быстро и удобно проводить определение параметров привода, а также запоминать в виде файла все параметры; во-вторых – активизировать подпрограммы самонастройки привода, которые в автоматическом режиме помогают пользователю (инженеру-наладчику) подобрать необходимые параметры регуляторов; в-третьих – вносить необходимые изменения в систему регулирования, адаптируя ее к конкретной технологической задаче.

Удобство параметрирования и настройки современных электроприводов с помощью персонального компьютера обеспечивается современными программными пакетами, которые позволяют иметь оперативный доступ к любому параметру привода, а также получить в цифровом виде осциллограммы переходных процессов для того, чтобы можно было оценить качество настройки системы регулирования. Например,

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

для приводов поколения SINAMICS таким программным пакетом является программа STARTER.

Для проведения исследования частотно-регулируемых электроприводов был создан стенд, структурная схема которого приведена на рис. 1.

В основе стенда лежит спарка двух электрических машин – асинхронной машины с короткозамкнутым ротором и синхронной машины с постоянными магнитами, – установленных на одном валу, каждая из которых подключена к собственному преобразователю частоты. При такой конструкции исследуемая машина может быть нагружена регулируемым моментом посредством нагрузочной машины.

Экспериментальный стенд для исследования режимов работы современных приводов переменного тока состоит из следующих частей:

– QF1, QF2 – автоматические выключатели;

– Simatic S7-314C 2DP – программируемый логический контроллер серии S7-300 с возможностью подключения децентрализованной периферии;

– компьютер, выступающий в качестве программатора;

– CP 5611 – коммуникационный процессор для программирования логического контроллера и приводов переменного тока;

– привод Sinamics G120;

– привод Sinamics S120;

– АМ – асинхронный двигатель;

– СМ – синхронный двигатель;

– ИД – импульсный датчик;

– Profibus – промышленная информационная сеть для коммуникации компьютера, программируемого логического контроллера и приводов.

Исследуемый асинхронный двигатель имеет следующие данные: номинальная мощность P_N=0,75 кВт, номинальное напряжение U_{SN}=380 В, номинальный ток I_{SN}=2,12 А, коэффициент мощности cosϕ_N=0,8, номинальная частота статора f_{SN}=50 Гц, номинальная скорость вращения вала двигателя n_N=1395 об/мин. В литературе [5] приведена методика расчета параметров Г-образной схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (рис. 2) на основе паспортных данных.

Потокообразующая компонента вектора тока статора в номинальном режиме определяется по формуле:

$$\hat{I}_{sdN} \approx \sqrt{2} \cdot I_{sN} \cdot \sqrt{1-\cos\varphi_N} \ .$$

Аналогично определяются:

моментообразующая компонента вектора тока статора

$$\hat{I}_{sqN} \approx \sqrt{2 \cdot I_N^2 - \hat{I}_{sdN}^2} \ ;$$

абсолютное скольжение

$$\omega_{rN} = 2 \cdot \pi \cdot \left(f_N - \frac{z_p \cdot n_N}{60} \right) ;$$

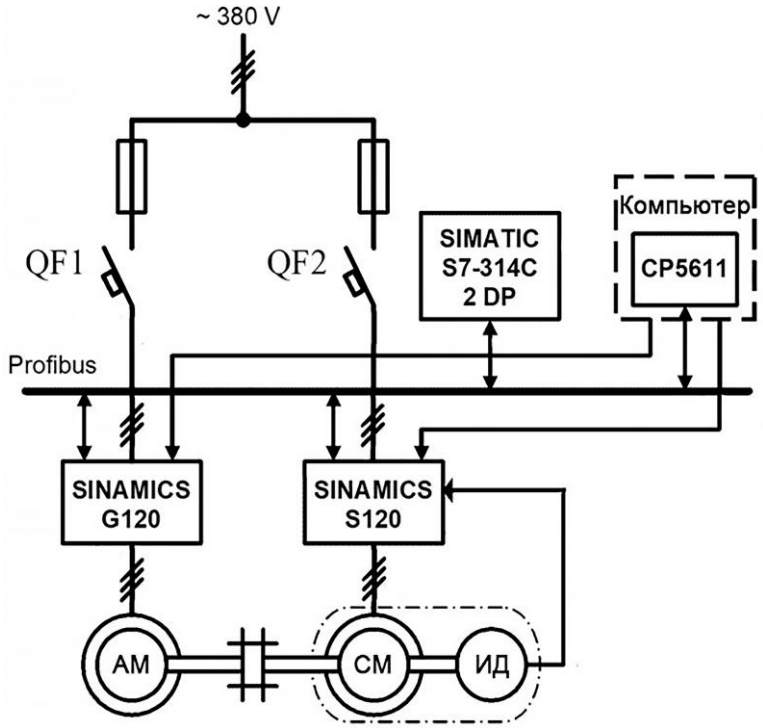


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда

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

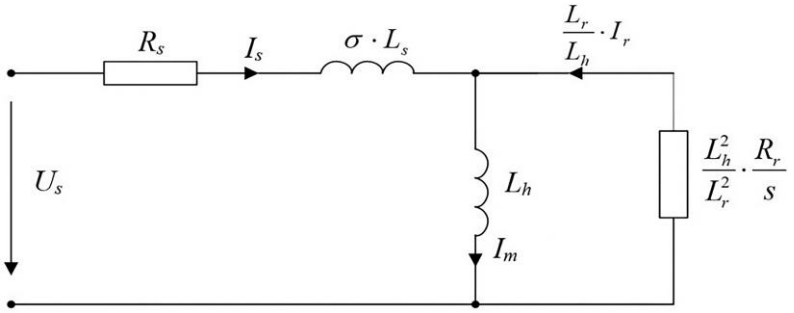


Рис. 2. Г-образная схема замещения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором

постоянная времени ротора

$$T_r = \frac{\hat{I}_{sqN}}{\omega_{rN} \cdot \hat{I}_{sdN}};$$

индуктивное сопротивление рассеяния

$$X_\sigma \approx \left(\sin\varphi - \cos\varphi \cdot \frac{\hat{I}_{sdN}}{\hat{I}_{sqN}} \right) \cdot \frac{U_{sN}}{\sqrt{3} \cdot I_{sN}};$$

индуктивное сопротивление главного контура намагничивания

$$X_h \approx \frac{\sqrt{2} \cdot U_{sN}}{\sqrt{3} \cdot \hat{I}_{sdN}} - X_\sigma;$$

активное сопротивление статора

$$R_s \approx \frac{\omega_{rN}}{2 \cdot \pi \cdot f_N} \cdot \frac{\hat{I}_{sdN}}{\hat{I}_{sqN}} \cdot X_h;$$

коэффициент рассеяния

$$\sigma \approx \frac{X_\sigma}{X_h};$$

значение главной индуктивности

$$L_h = \frac{X_h}{2 \cdot \pi \cdot f_N};$$

значение индуктивности статора

$$L_s = \frac{X_h}{(1-\sigma) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_N}.$$

В процессе исследований были рассчитаны параметры исследуемого двигателя по выше приведенной методике, а также определены аналогичные параметры в результате автоматической настройки. Результаты этих исследований приведены в табл. 1.

Таким образом, можно сделать вывод, что расчетные и измеренные параметры конкретного асинхронного двигателя существенно отличаются друг от друга. Это обуславливает необходимость применения программной самонастройки.

В приводах поколения SINAMICS заложены следующие способы регулирования скорости:

– *U/f* с линейной характеристикой;

– *U/f* с контролем тока намагничивания (*FCC*);

– *U/f* с программируемой зависимостью;

– U/f^2 с квадратичной зависимостью;

– *U/f* для текстильных машин;

– *U/f* с *FCC* для текстильных машин;

– *U/f* с независимым заданием напряжения;

– векторное регулирование без датчика скорости;

– векторное регулирование с датчиком скорости;

– бездатчиковое регулирование момента;

– датчиковое регулирование момента.

В данной работе приводится анализ наиболее распространенных систем регулирования:

– *U/f* с линейной зависимостью;

– *U/f* с *FCC*-управлением;

– векторное регулирование без датчика скорости.

В качестве критериев регулирования принято:

– максимальный диапазон регулирования $D=\omega_{max}/\omega_{min}$ при номинальном моменте нагрузки;

– максимальный момент (момент вблизи момента опрокидывания);

– ток статора двигателя I_s.

Табл. 1. Сравнение расчетных и измеренных параметров асинхронного двигателя

Параметр	Измеренные параметры	Расчетные параметры	Δ
R_S	10,658 Ом	7,375 Ом	30,81 %
L_h	488,107 мГц	671 мГц	27,25 %
σ	0,065	0,098	33,67 %

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

Исследования проводились для частот поля статора f=50 Гц, f=25 Гц, f=10 Гц, f=5 Гц, f=1 Гц.

На рис. 1…5 приведены механические характеристики привода $\omega_m=f(M_m)$ и зависимости тока статора от момента двигателя $I_s=f(M_m)$ для различных систем управления/регулирования и различных значений частоты поля статора.

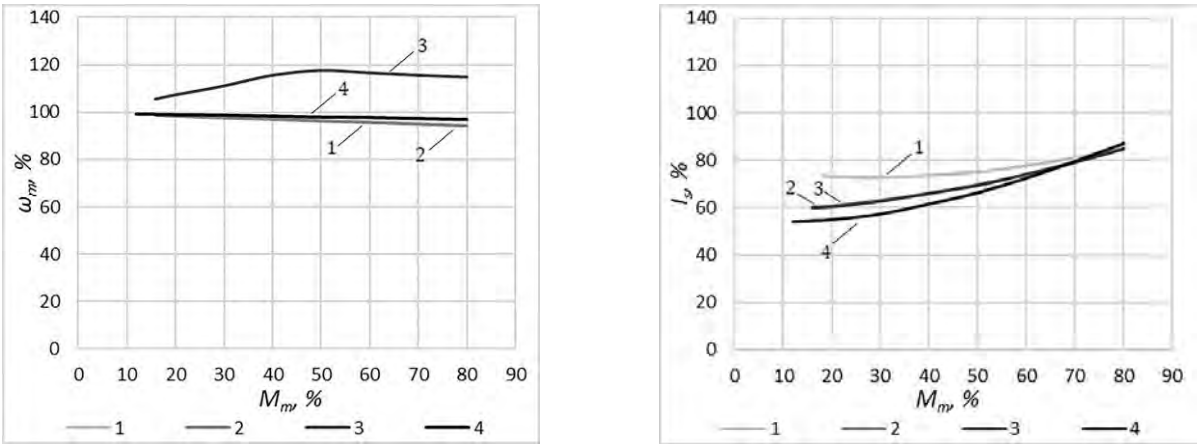


Рис. 1. Характеристики привода при частоте поля статора f =50 Гц для различных систем управления/регулирования:
1 – U/f с линейной зависимостью; *2 – FCC* без компенсации скольжения;
3 – FCC с компенсацией скольжения; *4* – векторное регулирование

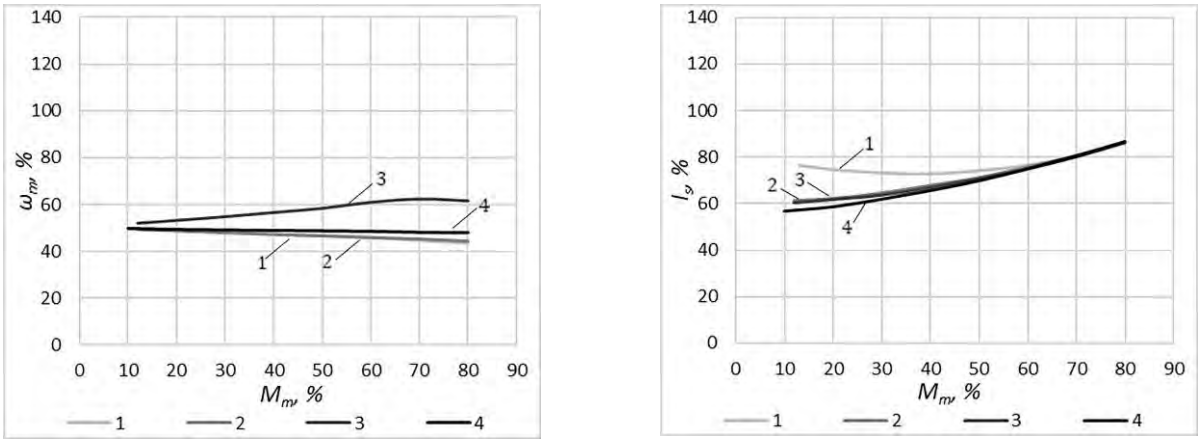


Рис. 2. Характеристики привода при частоте поля статора f =25 Гц для различных систем управления/регулирования:
1 – U/f с линейной зависимостью; *2 – FCC* без компенсации скольжения;
3 – FCC с компенсацией скольжения; *4* – векторное регулирование

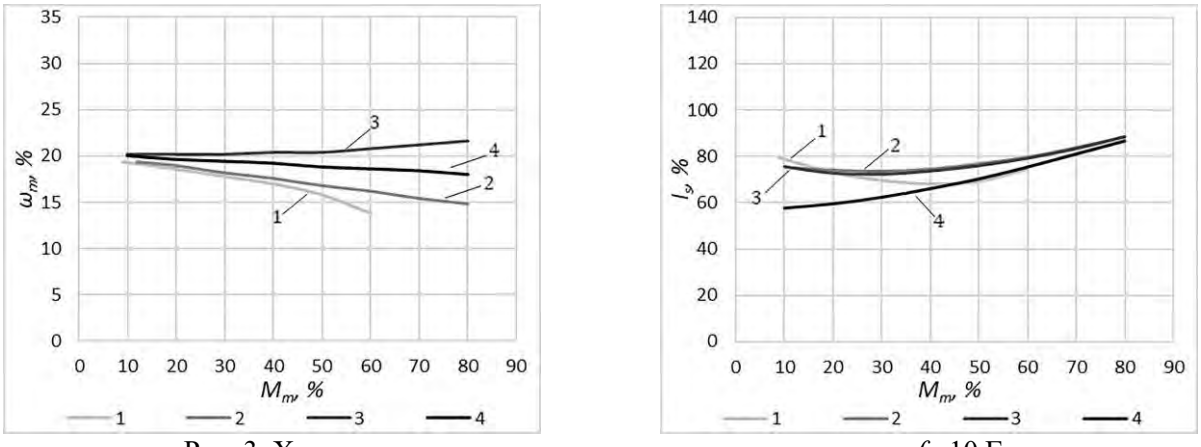


Рис. 3. Характеристики привода при частоте поля статора f =10 Гц для различных систем управления/регулирования:
1 – U/f с линейной зависимостью; *2 – FCC* без компенсации скольжения;
3 – FCC с компенсацией скольжения; *4* – векторное регулирование

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

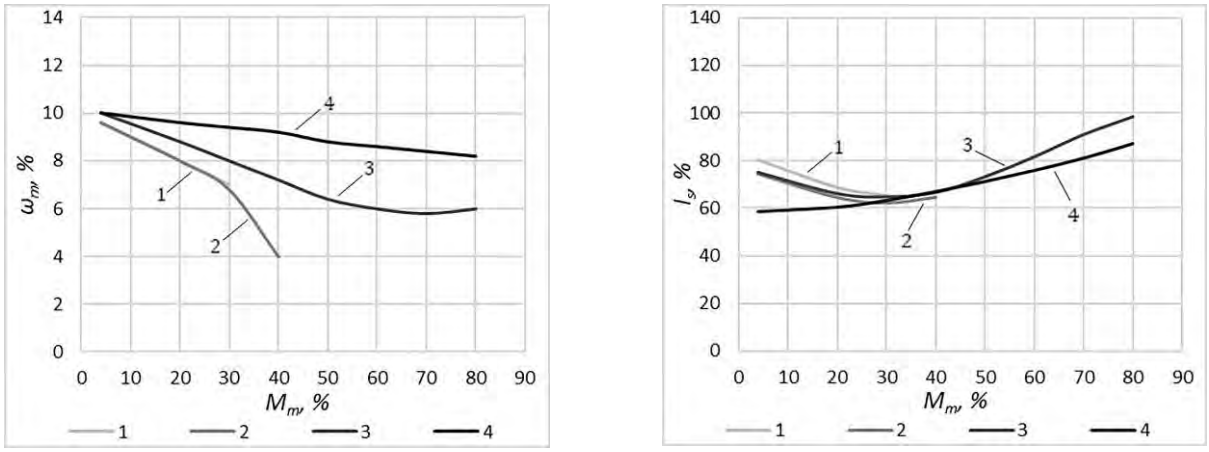


Рис. 4. Характеристики привода при частоте поля статора f =5 Гц
для различных систем управления/регулирования:
1 – U/f с линейной зависимостью; *2 – FCC* без компенсации скольжения;
3 – FCC с компенсацией скольжения; *4* – векторное регулирование

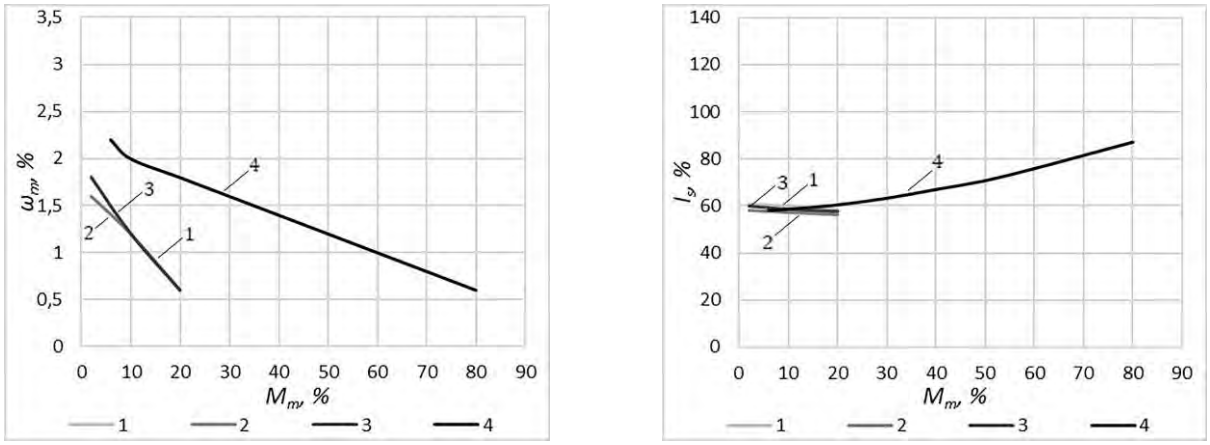


Рис. 5. Характеристики привода при частоте поля статора f =1 Гц
для различных систем управления/регулирования:
1 – U/f с линейной зависимостью; *2 – FCC* без компенсации скольжения;
3 – FCC с компенсацией скольжения; *4* – векторное регулирование

Приведенные зависимости $\omega_m=f(M_m)$ и $I_s=f(M_m)$ однозначно свидетельствуют о преимуществе применения векторного регулирования в широком диапазоне изменения скорости как с точки зрения обеспечения развиваемого момента двигателя, так и с точки зрения минимума тока статора.

Выводы

Анализ зависимостей $\omega_m=f(M_m)$ и $I_s=f(M_m)$ частотно-регулируемого привода показывает, что при выборе способа регулирования/управления скорости предпочтение следует отдать векторному регулированию без датчика скорости как с точки зрения стабильности механической характеристики, так и с точки зрения минимума потерь в двигателе. Учитывая, что параметры конкретного асинхронного короткозамкнутого двигателя существенно отличаются от аналогичных параметров, рассчитанных по табличным данным, при сравнении рекомендуется выбирать приводы с автоматической идентификацией параметров двигателя.

Список литературы

1. Schröder, D. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen. Auflage 4. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. – 1909 s.
2. Glumineau, A. Sensorless AC Electric Motor Control / A.Glumineau, J. de Leon Morales. – Cham: Springer, 2015. – 258 p.
3. Marino, R. Induction Motor Control Design / R.Marino, P.Tomei, M.Verrelli Cristiano. – London: Springer-Verlag, 2010. – 371 p.
4. Bin, Wu. High-Power Converters and AC Drive / Wu Bin, Narimani Mehdi. – New Jersey: IEEE Press, 2017. – 466 p.
5. Quang, Nguyen. Vector Control of Three-Phase AC Machines / Phung Quang Nguyen, Jörg-Andreas Dittrich. – Berlin: Springer-Verlag, 2015. – 374 p.

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

V.I. Kalashnikov /Cand. Sci. (Eng.)/, V.G. Chernikov, A.A. Gorbunov
Donetsk National Technical University (Donetsk)

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF METHODS FOR FREQUENCY CONTROL OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

Background. *The analysis of mechanical characteristics of an asynchronous drive for the same motor with different methods of frequency control over a wide range of speed changes allows a qualitative assessment of various control systems. Electric drives with microprocessor control systems allow determining the parameters of a specific motor automatically. The technical literature provides methods for determining engine parameters based on passport data. A comparative analysis is required to assess the difference between parameters obtained from passport data and those obtained as a result of self-tuning.*
Materials and/or methods. *Frequency-controlled electric drives were studied on an experimental stand. The stand is based on combining an asynchronous machine with a short-circuited rotor and a synchronous machine with permanent magnets. Each machine is connected to its own frequency converter. The investigated machine was loaded with a controlled moment through a loading machine. The parameters for the L-shaped replacement circuit of an asynchronous motor with a short-circuited rotor were calculated based on the passport data. Automatic determination of engine parameters was performed in the STARTER software package.*
Results. *The obtained dependences $\omega_m=f(M_m)$ and $I_s=f(M_m)$ have shown that scalar control does not provide a stable torque and engine speed over a wide range of speed changes. Vector control provides a stable torque and a set speed under load as well as a minimum stator current.*
Conclusion. *Analysis of the dependencies of the frequency-controlled drive $\omega_m=f(M_m)$ and $I_s=f(M_m)$ shows that vector control without a speed sensor is optimal both in terms of stability of the mechanical characteristic and in terms of minimum losses in the engine.. When comparing, it is recommended to select drives with automatic identification of engine parameters.*

Keywords: *frequency regulation, sensorless control, variable speed drive, speed-torque characteristic*s.

Сведения об авторах

В.И. Калашников
SPIN-код: 8002-9286
Author ID: 855701
ORCID ID: 0000-0001-5116-1486
Телефон: +380 (71) 334-92-91
Эл. почта: viktor_kalashnikov@donntu.org

А.А. Горбунов
Телефон: +380 (71) 331-54-83
Эл. почта: alekseygorbunov@hotmail.com

В.Г. Черников
Телефон: +380 (71) 378-61-67
Эл. почта: vinodel12@ukr.net

Статья поступила 10.03.2020 г.
© В.И. Калашников, В.Г. Черников, А.А. Горбунов, 2020
Рецензент д.т.н., проф. К.Н. Маренич

УДК 669.162

И.М. Мищенко /к.т.н./, Я.Ю. Асламова, А.В. Кузин /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
Н.Н. Коробкин, А.В. Полохин
Филиал №2 «Енакиевский металлургический завод» ЗАО «Внешторгсервис» (Енакиево)

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ ВЫСОКООФЛЮСОВАННОЙ ШИХТЫ, ФОРМИРУЕМОГО НА ПАЛЛЕТАХ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ МАШИНЫ

Определены и обоснованы параметры слоя высокоофлюсованной шихты, загружаемой на паллеты агломерационной машины. Показано, что их соблюдение позволяет обеспечить рациональные газодинамические и температурно-тепловые режимы спекания и достижение заданных показателей по объему производства и качеству агломерата.

***Ключевые слова**: агломерат, высокоофлюсованная шихта, высота слоя, гранулометрический состав, топливо, объемная плотность.*

Постановка проблемы

Производство агломератов повышенной (1,3…1,9 абс. ед.) и высокой (более 1,9 абс. ед.) основности целесообразно для использования их в доменной плавке с целью офлюсования малофлюсованных окатышей, доля которых в железорудной части доменной шихты отечественных предприятий составляет от 40…60 до 80…100 %. Подтверждены экономические и экологические преимущества такой технологии [1,2].

Повысить показатели качества высокоофлюсованного агломерата и производительность агломерационных машин возможно за счет совершенствования технологии подготовки и спекания шихты. Важнейшей заключительной стадией подготовки аглошихты, во многом определяющей эффективное спекание, является ее загрузка на паллеты агломашин. Для разработки рекомендаций по модернизации технологии загрузки необходимо определить и обосновать рациональные параметры слоя аглошихты, формируемого на паллетах.

Рациональные параметры слоя высокоофлюсованной шихты – это такие его свойства, благодаря которым достигается селективное (повышенное) содержание частиц топлива и извести в его верхних горизонтах, равное газодинамическое сопротивление по ширине агломашины, и теплотехнические характеристики, способствующие компенсации дефицита тепла в верхней части слоя и минимизации избытка тепла в нижней, где проявляет себя регенерация тепла из верхних в нижние горизонты спекаемого слоя.

Анализ последних исследований и публикаций

Масштабная экономическая и социально-экологическая суть производства высокоосновного агломерата проявляется в снижении себестоимости чугуна за счет сокращения расхода кокса и в существенном улучшении экологической обстановки в районах расположения аглофабрик, доменных цехов и коксохимических заводов. Также развитие технологии производства высокоосновного агломерата мотивировано возможным улучшением его металлургических свойств и уменьшением выбросов преимущественно сернистых веществ в атмосферу [1,3…5].

В отдельных работах [1,4] обобщены опытные данные о технологии производства агломератов повышенной и высокой основности. Сформулированные рекомендации сводятся, в частности, к тому, что при подготовке шихты к спеканию особое внимание должно быть уделено обеспечению требуемой крупности известняка и топлива (0…3 мм), однородности химического и гранулометрического составов агломерационной шихты.

Специфика производства высокоосновного агломерата состоит в нижеследующем.

Известны случаи [3], когда при спекании высокоосновной шихты образующийся расплав высокой текучести способен проникать из самого нижнего элементарного слоя горения топлива, в котором происходят процессы плавления шихты, в щели колосниковой решетки, закрывая их монолитной, заплавляющейся массой, резко ухудшающей газодинамику процесса спекания. Очистка колосниковой решетки агломашин от налипаний агломерационного расплава является трудоемкой операцией.

Устранить такое вредное явление возможно при обязательном наличии в загружаемой на аг-

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

ломашины шихте достаточного количества (40…50 %) крупных фракций 6…10 мм аглоруды, возврата, других материалов, способных образовать сплошной слой естественной постели, разумеется, при обеспечении оптимальных условий сегрегации этих крупных фракций шихты в нижние горизонты слоя [6,7].

При производстве офлюсованных агломератов в структуре спеков возможно образование при температурах выше 1420 °С такой проблемной фазы, как высокотемпературная β-модификация двухкальциевого силиката $2CaO \cdot SiO_2$ (β-C2S), обладающей при охлаждении спека ниже 675 °С полиморфизмом, то есть способностью перестройки кристаллической решетки и перехода в иную γ-модификацию при увеличении объема этой фазы на 10 % [3,8…12].

Вероятность появления проблемной β-модификации обусловлена достижением максимальных температур в зоне плавления шихты, превышающих 1400 °С. При плавлении высокоосновной шихты в условиях умеренных температур 1220…1250 °С такая вероятность мала. При основности шихты 1,2…1,4 абс. ед. температура плавления достигает 1350…1380 °С и, следовательно, вероятность появления β-C2S и его силикатного распада существенно выше.

Использование в шихте тонких железорудных концентратов и труднокомкуемых отходов не является большим препятствием для производства высокоосновного агломерата удовлетворительного качества. Так, в агломерационном цехе Енакиевского металлургического завода (ЕМЗ) увеличение основности агломерата от 1,46 до 2,28 абс. ед. в нестабильных условиях работы сопровождалось снижением барабанной прочности от 66,1 до 63,5 % при практически неизменном содержании в агломерате фракции 0…5 мм – 16,46 и 16,73 % [13,14]. В ходе проведенных ранее опытно-промышленных исследований в условиях этого предприятия [4] было установлено, что при спекании шихт основностью 1,23…2,38 абс.ед., содержащих около 70 % богатого железорудного концентрата, увеличение расхода топлива на процесс не требуется – его содержание в шихте, по углероду горючему, остается в пределах 4,05…4,45 %.

Известно, что скорость спекания шихты, расположенной в прибортовой зоне паллеты, выше, чем в центральной части [15,16]. По этой причине снижается производительность агломашин на 8…10 %, ускоряется износ периферийных частей подколосниковых балок паллет. Для высокоофлюсованных шихт проблема усугубляется повышенной по сравнению с обычными шихтами газопроницаемостью.

В результате проведенного аналитического обзора литературных источников не выявлены специфические требования к загрузке высокоофлюсованных шихт, что объясняется недостатком информации об аналитических, лабораторных и промышленных исследованиях освоения технологии их спекания. Ввиду современных тенденций по переходу к производству агломератов высокой основности необходимо исследовать технологию формирования слоя шихты на агломашинах и аргументировать его рациональные параметры.

Цель (задачи) исследования

Целью работы является обоснование параметров слоя высокоофлюсованной шихты на паллетах агломерационных машин с учетом специфики процессов ее подготовки и спекания.

Основной материал исследования

Выбор параметров слоя высокоосновной шихты позволяет обеспечить оптимальные газодинамические и температурно-тепловые режимы ее спекания, достижение заданных показателей по объему производства и качеству агломерата. Чаще в отечественной практике эти показатели касаются прочности и гранулометрического состава агломерата.

Обоснование для условий конкретного производства параметров слоя дает возможность разработать меры по повышению эффективности управления процессом спекания высокоофлюсованной шихты. На основе исследований, выполненных в агломерационном цехе ЕМЗ, нами сформулированы рациональные параметры слоя, формируемого на паллетах. Такими параметрами являются:

– высота слоя высокоофлюсованной шихты на паллетах на уровне не менее 300…350 мм;

– идентичные гранулометрический, химический составы и газодинамические свойства слоя шихты по ширине агломерационной машины;

– рациональное распределение гранулометрического состава шихты и твердого топлива по высоте слоя;

– стабилизация объемной плотности шихты по высоте и ширине слоя.

Ниже приведено последовательное обоснование указанных параметров.

Высота формируемого на паллетах агломашин слоя шихты

Высота слоя шихты на паллетах является главным параметром, поскольку при ее увеличении кардинально улучшаются температурно-тепловые условия спекания шихты и формирования аглоспека повышенной прочности.

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

Увеличенная высота слоя при спекании шихты обеспечивает следующие преимущества. Возрастает доля участия в процессах горения топлива и плавления шихты регенерированного (возвращаемого всасываемым воздухом) тепла горячего охлаждающегося аглоспека, повышаются температуры и продолжительность пребывания расплава при благоприятных условиях кристаллизации основных минералов аглоспека. Значительно снижается потребность в теплоте от сжигания углерода топлива. Доля тепла регенерации в зональных тепловых балансах нагрева шихты нижних, преобладающих по толще высокого слоя, элементарных слоев может достигать 65,5…71,2 % [17].

Только в верхних элементарных слоях (140…160 мм от поверхности слоя) нужна повышенная концентрация горючего углерода в шихте, а в нижних элементарных слоях, где достигается высокая доля тепла регенерации в зональных тепловых балансах нагрева слоев, содержание топлива в шихте не должно превышать минимальных значений. Как видно по кривым рис. 1 [1], теоретическая разница по содержанию углерода топлива в шихте верхних и нижних элементарных слоев может достигать 4…5 % (кривая 2). В промышленных условиях эта величина не превышает 1…1,5 %, потому что действующие загрузочные устройства при существующем гранулометрическом составе шихты не гарантируют высокую степень сегрегации частиц твердого топлива, сосредоточение их преимущественно в верхних горизонтах формируемого слоя. И все же для высокослойного спекания характерна большая экономия топлива, достигающая в среднем 4…5 % на каждые 50 мм увеличения высоты слоя. При этом повышение степени сегрегации шихты по углероду твердого топлива может давать дополнительную экономию топлива, по расчетам Ю.А. Фролова [16], от 2,2 до 6,2 % для слоев высотой, соответственно, 220 и 550 мм.

Стремление к увеличению высоты спекаемого слоя шихты подтверждает опыт отечественной и мировой агломерации. Если рекордом 60-х годов прошлого века считалось спекание железоконцентратных шихт в слоях высотой 280…300 мм, то в последние десятилетия в России хорошо подготовленные шихты спекают в слоях 400…550 мм, а за рубежом в слоях 600…700 мм. На Магнитогорском металлургическом комбинате в 2017 году сооружена и запущена агломашина, на которой предусмотрено спекание шихты в слое 700 мм [1].

Высокослойное спекание шихты, как правило, сопровождается уменьшением расхода твердого топлива, повышением прочности, улучшением гранулометрического состава агломерата, соответствующим значительным улучшением показателей доменного производства. Иногда возможно увеличение и производительности агломашин.

Отметим, что в производственных условиях решение вопроса об оптимальной высоте слоя шихты находится как компромисс между рациональной скоростью спекания (производительностью агломашин) и прочностью агломерата. При отсутствии жестких требований в отношении объемов производства агломерата решение по увеличению высоты спекаемого слоя принимают исключительно по соображениям повышения прочности, улучшения гранулометрического состава годного агломерата, сокращения расхода твердого топлива на агломерацию, что особенно важно при спекании высокоофлюсованных шихт.

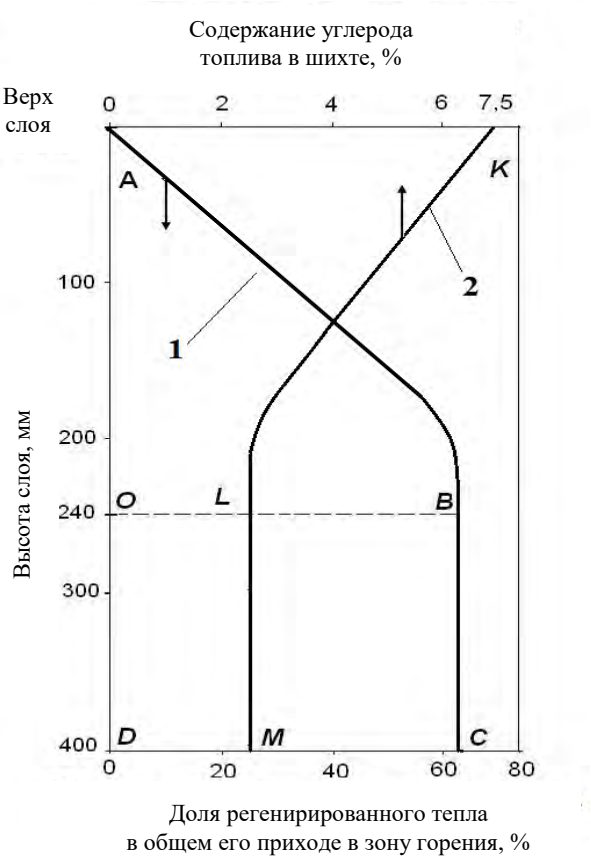


Рис. 1. Изменение доли регенерированного тепла в тепловом балансе зоны горения и содержание горючего углерода шихты по высоте слоев 240 и 400 мм: *1* – график, характеризующий приход регенерированного тепла по мере перемещения зоны горения топлива от верхних до нижних элементарных слоев; *2* – график оптимального расхода – распределения углерода топлива по высоте слоя

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

Опыт производства в 2019 году в агломерационном цехе ЕМЗ агломерата основностью 1,8…5,0 абс.ед. является примером следования по пути неуклонного поддержания рациональной высоты спекаемого слоя даже в крайне сложных шихтовых и производственных условиях, когда утрачивались основные условия высокослойного спекания: достаточная газопроницаемость слоя шихты и обеспечение эксгаустерами необходимого разрежения под спекаемым слоем, при котором достигается минимально необходимая скорость фильтрации газов – скорость спекания шихты.

Параметры работы агломерационных машин ЕМЗ в 2019 году характеризуются низкой скоростью спекания, которая в среднем составляет 10 мм/мин, вследствие недостаточной газопроницаемости слоя шихты из смеси отходов и плохо комкующихся концентратов, а также малого разрежения в газовых коллекторах агломашин на уровне 4,5 кПа. При этом высота спекаемого слоя поддерживается на достаточном уровне, 300…350 мм, для достижения самого важного показателя – необходимой прочности агломерата. Поставленная цель реализуется вполне успешно: содержание класса 0…5 мм в агломерате составляет, в лучшие периоды 2019 года, от 12,8 до 17,5 %.

Таким образом, считаем обоснованным и целесообразным применение в дальнейшем технологического регламента спекания высокоофлюсованной шихты в повышенных слоях высотой 350…400 мм. Естественно, при выполнении системных мероприятий, касающихся повышения качества подготовки шихты и улучшения состояния газодинамических сетей агломашин.

Идентичный гранулометрический, химический составы и газодинамические свойства слоя шихты по ширине агломерационной машины

В обстоятельной монографии по исследованию теории и технологии агломерации [16] подчеркиваются требования по минимизации неоднородности гранулометрического состава шихты и концентрации топлива в объеме слоя, а также по равномерному распределению гранулометрического состава шихты по ширине слоя.

К сожалению, при существующих загрузочных устройствах и реальной крупности промышленных шихт указанные показатели по их распределению по ширине и по высоте формируемого слоя достигаются лишь частично.

В загрузочной воронке (промежуточном бункере) комбинированных загрузочных устройств агломашин узкий поток падающей из барабана-окомкователя окомкованной шихты преобразуется в широкий, соответствующий ширине агломашины, слой за счет «маятниковой» или «ленточной» укладки относительно тонких порций шихты. При загрузке загрузочной воронки простейшим способом (на конус) или при более совершенной загрузке воронки с помощью челнокового распределителя, не исключается сегрегация более крупной шихты на периферийные участки загружаемого в воронку слоя.

Новые исследования распределения гранулометрического состава шихты в загрузочной воронке агломашины №3 ЕМЗ показали, что по образующим конуса загрузки шихты из барабана-окомкователя в воронку (рис. 2) происходит сегрегация гранул, комков, укрупненных частиц шихты к ее боковым стенкам.

В итоге кривая распределения гранулометрического состава шихты по длине загрузочной воронки, соответствующей ширине агломашины, представляет собой кривую, напоминающую вогнутую параболу (рис. 3). Причем при несимметричном расположении конуса загрузки 4 в воронке 2 (рис. 2) по более длинной его образующей ОА сегрегируют бóльшие массы крупной шихты, чем по более короткой образующей ОВ.

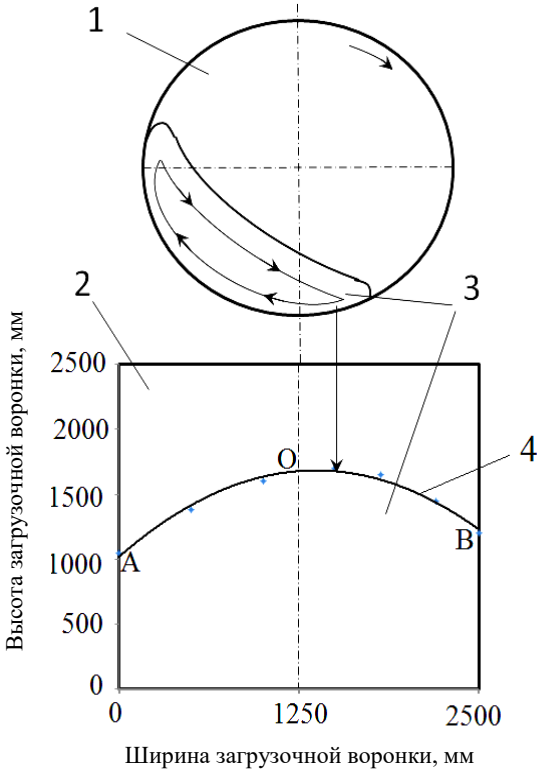


Рис. 2. Профиль слоя шихты в загрузочной воронке:
1 – барабан-окомкователь; *2* – загрузочная воронка; *3* – шихта; *4* – конус загрузки

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

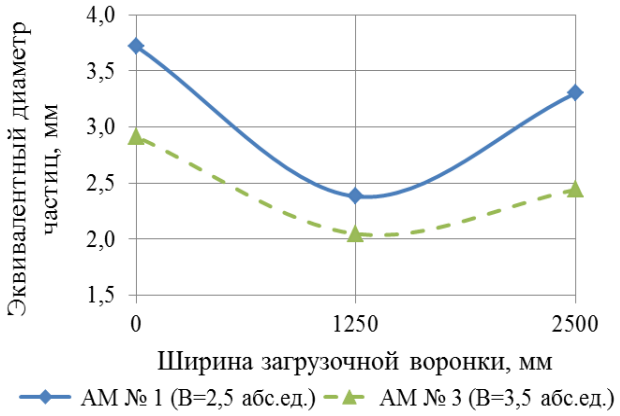
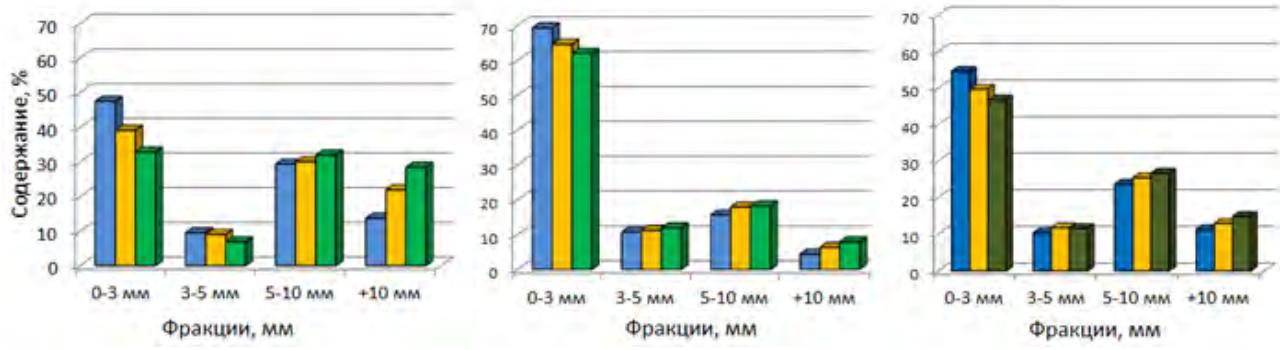


Рис. 3. Изменение гранулометрического состава шихт основностью 2,5 и 3,5 абс.ед. по ширине загрузочной воронки на агломашине № 1 и № 3 ЕМЗ

После синхронной, параллельными потоками, перегрузки шихты из загрузочной воронки на паллеты агломашины соотношение классов крупности по ширине слоя качественно не меняется, что подтверждают проведенные исследования гранулометрического состава шихты по высоте и ширине слоя на паллете (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что в прибортовых зонах паллет содержание в шихте фракции 0…3 мм различно и на 15…20 % ниже, чем в центральной зоне. С учетом того, что частицы топлива и известняка сосредоточены преимущественно в гранулах крупностью 0…3 мм, следствием выявленного распределения шихты по гранулометрическому составу является неоднородный по ширине агломашины химический состав шихты. По данным промышленных исследований (рис. 5), разница между содержанием углерода в шихте прибортовой и осевой зоны составляет 0,2…0,35 %. Следовательно, в периферийный слой шихты вносится тепла от горения топлива меньше, чем в слой осевой зоны.

В связи с выявленным распределением шихты по крупности по ширине паллеты интерес представляет изменение начальной газопроницаемости слоя по ширине агломашины.



а б в

Рис. 4. Распределение шихты основностью 3,5 абс.ед. по крупности по ширине и высоте паллеты при высоте слоя 350 мм: *а* – левый борт; *б* – центр; *в* – правый борт; ■ верх слоя; ■ середина слоя; ■ низ слоя

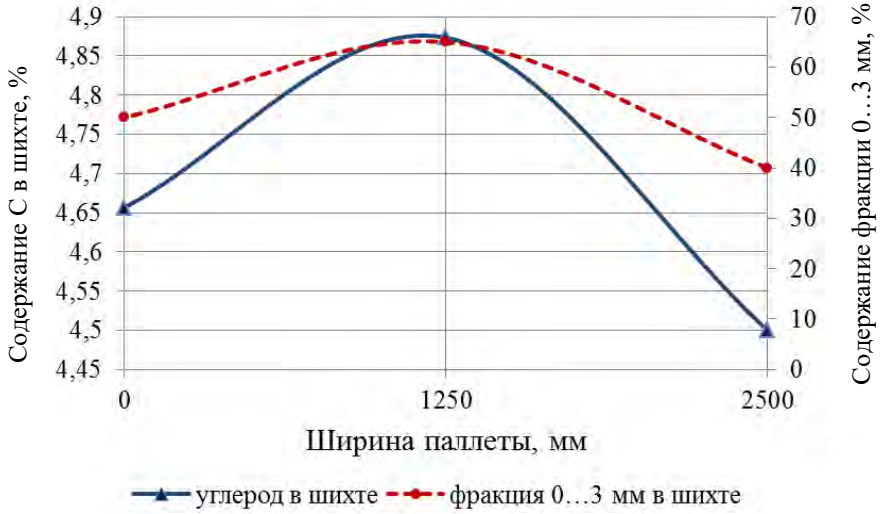


Рис. 5. Распределение фракции 0…3 мм и горючего углерода в шихте по ширине агломашины

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

В данном случае под начальной подразумевается газопроницаемость слоя, уложенного на агломашину, до начала процесса спекания. В качестве характеристики газопроницаемости может выступать величина удельного газодинамического сопротивления слоя, определяемая по формуле [16]:

$$C = \frac{\Delta P}{H_{сл}},$$

где C – удельное газодинамическое сопротивление слоя шихты, кПа/м; ΔP – перепад давления газа в слое, кПа; $H_{сл}$ – высота слоя, м.

Для оценки газопроницаемости слоя аглошихт различной основности проведены лабораторные исследования, по результатам которых получена зависимость перепада давления газа в слое шихты высотой 270 мм от гранулометрического состава по ширине паллеты. Полученная кривая, описывающая изменение удельного газодинамического сопротивления слоя по ширине агломашины с такой же, как в загрузочной воронке, гранулометрической характеристикой, представляет собой выпуклую кривую, похожую на параболу (рис. 6). Периферийные слои имеют явную повышенную газопроницаемость.

Измеренное в лабораторных условиях удельное газодинамическое сопротивление слоя осевой зоны на 10…12 % выше, чем слоев периферийной зоны. Этому способствует более крупная шихта периферийных слоев. На практике эта разница может составлять 25…50 % за счет действия пристеночного, прибортового эффекта.

По промышленным данным Ю.А. Фролова [18], шихта из тонкоизмельченного концентрата в слое 300 мм спекается в периферийных слоях шириной 250 мм от левого и правого бортов агломашины со скоростью, на 30 % превышающей скорость спекания шихты по оси агломашины. Только на расстоянии 500 мм от бортов скорость спекания практически не отличается от скорости спекания шихты по оси агломашины.

Образующиеся на периферии паллеты спеки шириной 250 мм обладают высокой газопроницаемостью и до завершения процесса спекания шихты по оси агломашины являются источниками больших вредных прососов атмосферного воздуха, вызывая потери производительности агломашин на 8…10 %.

Для периферийных участков аглоспека характерны повышенная пористость и низкая прочность. Подобные явления происходят, в том числе, и на агломашинах ЕМЗ.

Высоту слоя шихты на паллетах агломашин регулируют в зависимости от газодинамического сопротивления слоя и уровня разрежения в газовых коллекторах агломашин. Рациональным, с точки зрения авторов статьи, способом выравнивания газопроницаемости слоя по ширине паллеты является дополнительное увеличение высоты слоя на периферийных, прибортовых участках. В соответствии с данными исследований ситового состава и газодинамических свойств шихт различной крупности по ширине агломашины (рис. 6) предложено постепенное увеличение высоты слоя к бортам на 15…25 % от исходной высоты, начиная с точки значительного увеличения крупности шихты на кривой распределения гранулометрического состава по ширине паллеты, которая находится на расстоянии 500…700 мм от бортов паллеты (рис. 7).

Рациональное распределение гранулометрического состава шихты и твердого топлива по высоте слоя

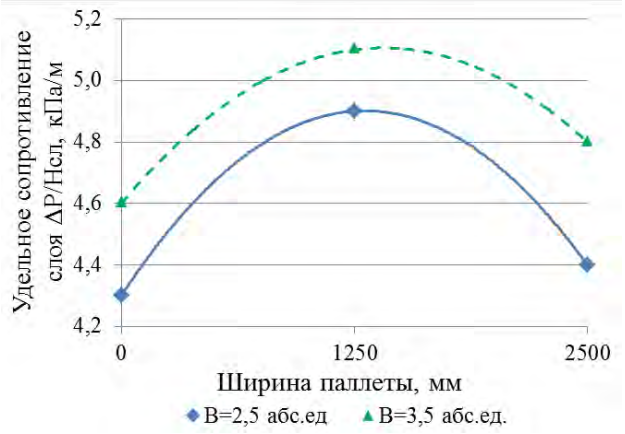


Рис. 6. Изменение удельного газодинамического сопротивления слоя шихты высотой 270 мм по ширине агломашины по лабораторным данным

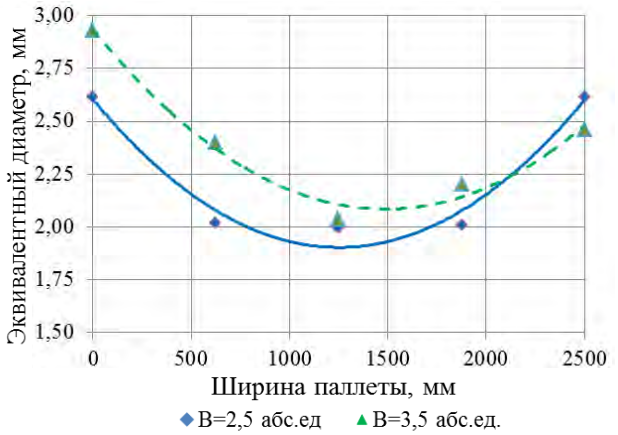


Рис. 7. Изменение показателя крупности высокоофлюсованной шихты по ширине паллеты

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

Одно из важнейших предназначений технологии загрузки шихты на паллеты агломашин – рациональное распределение гранулометрического состава и твердого топлива по высоте слоя. От этого параметра в значительной мере зависят прочность агломерата и производительность агломашин.

Управляет распределением шихты по высоте слоя процесс сегрегации, без которого невозможно проведение нормального спекания шихты.

Благодаря сегрегации содержание горючего углерода и оксида кальция, сосредоточенных в мелких фракциях шихты, в направлении поверхности слоя непрерывно повышается (рис. 8).

Рациональное распределение гранулометрического состава шихты по высоте слоя сопровождается снижением его газодинамического сопротивления, повышением скорости фильтрации всасываемого воздуха, увеличением скорости спекания и, соответственно, производительности агломашин.

Рациональное распределение частиц топлива по высоте слоя находится в полном соответствии с температурно-тепловыми условиями нагрева и плавления шихты в отдельных элементарных слоях по высоте слоя в соответствии с зональными тепловыми балансами, в которых возрастает роль тепла регенерации и снижается роль тепла от сжигания углерода топлива. Концентрация топлива в нижних горизонтах может снижаться до минимальной, достигающей 2,5 % абс. ед., в сравнении с 6,5 % абс. ед. в верхнем слое (см. рис. 1).

В промышленных условиях наблюдается значительно меньшее отличие концентраций углерода твердого топлива и средней крупности шихты по высоте слоя. По горючему углероду шихты эта разница (верх и низ слоя) во многих случаях не превышает 0,9… 1,3 % абс. ед. [16].

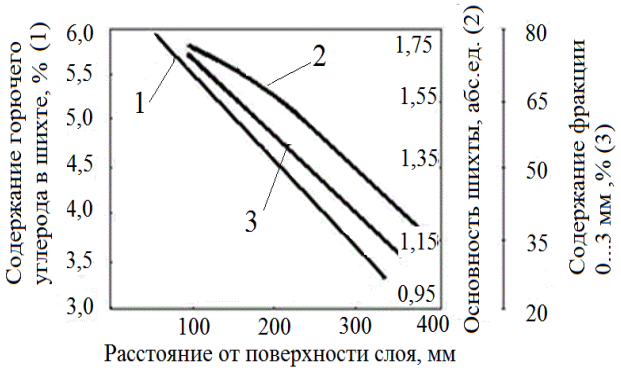


Рис. 8. Изменение крупности и химического состава шихты по высоте слоя [1]

Как было отмечено выше, в процессах подготовки и спекания высокоосновной шихты имеют место как минимум две негативные особенности, связанные с образованием большого количества жидкотекучего расплава, заплавляющего щели колосниковой решетки, и возможностью возникновения в отдельных микрообъемах шихты β-C2S, склонного к силикатному распаду. По нашему мнению, чтобы устранить влияние этих факторов на качество агломерата, процесс спекания и рабочее состояние колосниковой решетки, требуется выполнение следующих условий:

– для образования в процессе сегрегации слоя естественной постели толщиной не менее 30…40 мм обязательно наличие в шихте, загружаемой на агломашины, не менее 10…15 % крупных фракций более 8 мм. Через такой сплошной слой невозможно проникновение высокоосновного расплава повышенной текучести в щели колосниковой решетки паллет агломашин и превращение их в неработоспособные. Нужное количество крупных фракций в шихте достигается выделением из агломерата достаточного количества крупного (до 10…14 мм) возврата и применением в рудной части шихты не менее 10…15 % аглоруды;

– для исключения образования в отдельных микрообъемах нижней части слоя проблемной высокотемпературной модификации β-C2S необходимо минимизировать наличие в твердом топливе крупных фракций, способных сегрегировать в нижние горизонты слоя и создавать там при горении локальные объемы проблемной фазы. То есть в случае производства высокоосновного агломерата технология измельчения твердого топлива должна гарантировать получение измельченного продукта крупностью 0…3 мм строго не менее 93…95 %.

Формирование объемной плотности шихты в верхней части слоя, близкой по величине к плотности шихты средней части, выравнивание объемной плотности шихты по ширине паллеты

Объемная плотность шихты в слое является важной физико-механической характеристикой, связывающей скорость спекания и прочность спека. В промышленных условиях объемную плотность обычно не регулируют, однако в случае формирования на паллетах слоя шихты с вогнутопараболической формой поверхности проблема повышения объемной плотности верхнего элементарного слоя заслуживает отдельного внимания. Кроме того, по данным опытно-промышленных исследований в условиях ЕМЗ, объемная плотность слоя шихты высотой 350 мм в прибортовой зоне ниже на 5…7 % объемной

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

плотности шихты осевой зоны. Следовательно, периферийные участки слоя имеют большую порозность и меньшее газодинамическое сопротивление, что является одной из причин повышенной скорости спекания шихты этой зоны.

Вогнутопараболическая форма поверхности слоя шихты 2 (рис. 9) с высотой 4, увеличивающейся к бортам 3, способствует решению задачи уравнивания скоростей спекания шихты в центре и на периферии паллеты 1. Криволинейную, на периферийных участках, поверхность слоя после формирования там дополнительных слоев, необходимо выравнивать путем уплотнения и заглаживания поверхности секционной гладилкой особой конструкции с автономными утяжеленными боковыми секциями 3 с загнутой в виде лыжи передней кромкой (рис. 10). Утяжеленные 3 и облегченная 4 секции крепятся к штанге 1 подвижными цепными тягами 2.

После обработки секционной гладилкой поверхность слоя поступает под зажигательный горн плоской и уплотненной. В этом случае обеспечивается достаточная прочность аглоспека верхнего элементарного слоя [16]. При удельном давлении периферийных, самых тяжелых и узких, секций гладилки 3 (рис. 10), достигающем 170…200 кг/м^2, усадка слоя может составлять 25…30 мм, и объемная плотность шихты верхнего элементарного слоя толщиной 30…40 мм повышается ориентировочно на 150…170 кг/м^3, достигая рациональных значений плотности шихты средних слоев (для шихт из концентратов и отходов примерно 1800…2000 кг/м^3), находящихся на глубине 150…170 мм от верха слоя. Давление, оказываемое центральной облегченной секцией 4 на осевую зону паллеты, ниже и составляет 50…70 кг/м^2. Повышение прочности верхней части спека ведет к увеличению выхода годного продукта из него, что компенсирует снижение скорости спекания уплотненного слоя и сохраняет производительность агломашины на прежнем уровне.

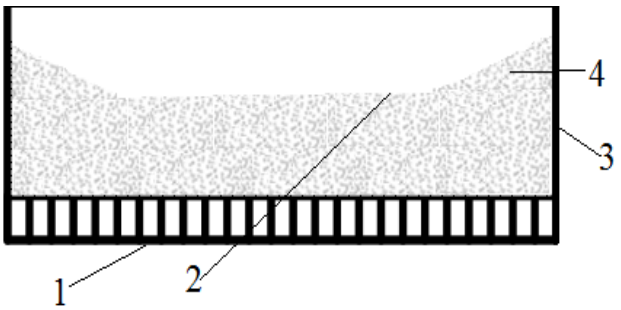


Рис. 9. Форма слоя шихты на паллете агломашины: *1* – паллета; *2* – поверхность слоя шихты; *3* – борт паллеты; *4* – периферийная увеличенная зона слоя аглошихты

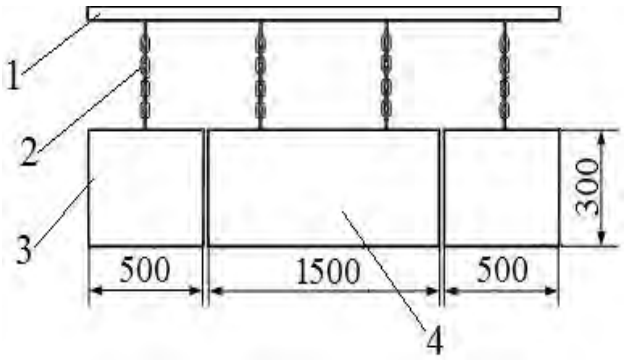


Рис. 10. Принципиальная схема секционной гладилки поверхности слоя аглошихты: *1* – штанга для крепления цепных тяг; *2* – цепные тяги, удерживающие секции гладилки; *3* – первые утяжеленные, 170…200 кг/м^2, секции гладилки для максимального выравнивания и уплотнения периферийных участков слоя шихты; *4* – центральная облегченная секция, 50…70 кг/м^2, для заглаживания осевого участка слоя

Выводы

По литературным данным, лабораторным и промышленным исследованиям определены и обоснованы параметры слоя высокоофлюсованной шихты, загружаемой на паллеты агломерационной машины.

В результате анализа показателей работы машин агломерационного цеха ЕМЗ доказано, что спекание высокоофлюсованной шихты в повышенных слоях высотой 350…400 мм способствует достижению необходимой прочности агломерата, характеризуемой содержанием класса 0…5 мм в скиповом агломерате не более 15…17 %.

При существующем способе загрузки комбинированным загрузочным устройством на паллетах формируется слой шихты, в периферийных зонах которого спекание шихты протекает быстрее, чем в осевой зоне. Для выравнивания скорости спекания по ширине агломерационной машины слой должен обладать идентичными гранулометрическим, химическим составами и газодинамическими свойствами. Формирование на паллетах слоя высокоофлюсованной шихты с вогнутопараболической формой поверхности и с высотой, увеличивающейся к бортам, способствует решению этой задачи.

Вероятность заплавления щелей колосниковой решетки жидкотекучим расплавом высокофлюсованной шихты и образования склонного к силикатному распаду двукальциевого силиката β-модификации минимизируется путем рационального распределения грануло-

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

метрического состава шихты и твердого топлива по высоте слоя. Толщина слоя естественной защитной постели должна оставлять не менее 30…40 мм.

Вероятность сегрегации относительно крупных фракций твердого топлива в нижние горизонты слоя исключается его качественным измельчением (содержание фракции 0…3 мм не менее 93…95 %).

Выравнивание объемной плотности шихты верхней части слоя по ширине паллеты ведет к повышению прочности этой части спека, особенно в прибортовой зоне, что обеспечивает увеличение выхода годного продукта из спека и компенсацию потерь скорости спекания уплотненных слоев. Причем при формировании слоя с вогнутопараболической формой поверхности требуется приложение различных по ширине паллеты давлений для уплотнения шихты. Это возможно при обработке поверхности секционной гладилкой, конструкция которой позволяет регулировать давление периферийных секций путем применения навесных грузов.

Контроль эффективности регулирования объемной плотности шихты по ширине агломашины обеспечивается путем непрерывного автоматического измерения температуры отходящих газов в предпоследних вакуумкамерах агломашин в их трех точках: по оси агломашин и на расстоянии 250…300 мм от вертикальных линий правого и левого бортов паллет.

Таким образом, усовершенствованы представления о рациональных параметрах слоя высокоофлюсованной шихты, сформированного на паллетах агломашины. Полученные результаты исследований являются основой для разработки мероприятий по модернизации технологии загрузки шихты на агломерационную машину.

Список литературы

1. Мищенко, И.М. Черная металлургия и охрана окружающей среды. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 446 с.
2. Андронов, В.Н. Минимально возможный расход кокса и влияние на него различных факторов доменной плавки. – СПб.: СПбГТУ, 2001. – 142 с.
3. Утков, В.А. Высокоосновный агломерат. – М.: Металлургия, 1977. – 156 с.
4. Совершенствование агломерационного процесса / Ф.Ф. Колесанов [и др.]. – К.: Техніка, 1983. – 110 с.
5. Влияние качества исходного сырья на прочность высокоосновного агломерата / В.А. Утков [и др.] // Обогащение руд. – 1963. – №5. – С.33-38.
6. Предупреждение залипания колосников спекательных тележек агломерационных машин / И.М. Мищенко [и др.] // Черная металлургия. – 1985. – №10. – С. 47-49.
7. Kavasaki, M. Development of method for packing top layer of the sinter bed / CURR Adv. Mater. Fnd. proc. – 1990. – No.1. – P. 58.
8. Кривенко, С.В. Структура агломератов различной основности / С.В. Кривенко, Г.Г. Божков // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2014. – Вип. 28. – С. 31-37. (серія: технічні науки).
9. Тарасов, В.П. Свойства агломератов разной основности / В.П. Тарасов, С.В. Кривенко, Г.Г. Божков // Сталь. – 2015. – №1. – С. 2-5.
10. Малышева, Т.Я. Механизм минералообразования и металлургические свойства агломератов основности 1,1-3,1 в условиях ММК / Т.Я. Малышева, Ю.С. Юсфин, Н.Р. Мансурова // Сталь. – 2007. – № 2. – С. 19-22.
11. Iron Ore Sintering: Quality Indices / D. Fernández-González et al. // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2017. – Vol.38. – P. 254-264.
12. Вегман, Е.Ф. Теория и технология агломерации. – М.: Металлургия, 1974. – 288 с.
13. Опыт производства высокоофлюсованного агломерата на агломерационной фабрике Енакиевского металлургического завода / И.М. Мищенко [и др.] // Черная металлургия. – 2018. – №12. – С. 33-45.
14. Исследование и совершенствование технологии загрузки шихты на паллеты агломерационных машин / И.М. Мищенко [и др.] // Научно-технический прогресс в черной металлургии-2019: Материалы IV Междунар. науч. конф. 18-20 сентября 2019 г., Череповец. – Череповец: ЧГУ, 2019. – С. 152-157.
15. A process model for uniform transverse distribution in a sinter plant / S. Mitra, M. Gangadaran, M.T. Raj et al. // Steel Time International. – 2005. – No.5. – P. 17-18.
16. Фролов, Ю.А. Агломерация: технология, теплотехника, управление, экология. – Москва: Металлургиздат, 2016. – 672 с.
17. Сигов, А.А. Агломерационный процесс / А.А. Сигов, В.А. Шурхал. – К.: Техніка, 1969. – 232 с.
18. Исследование процесса агломерации с использованием информации новой АСУ ТП агломерационной машины АКМ-312 ОАО «НЛМК» / Ю.А. Фролов [и др.] // Сталь. – 2010. – №5. – С. 24-29.

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

I.M. Mishchenko /Cand. Sci. (Eng.)/, Ya.Yu. Aslamova, A.V. Kuzin /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
N.N. Korobkin, A.V. Polohin
Branch No. 2 «Enakievo Metallurgical Plant» CJSC «Vneshtorgservice» (Enakievo)

SUBSTANTIATION OF RATIONAL PARAMETERS OF HIGH-FLUXED CHARGE LAYER FORMED ON PALLETS OF AN AGGLOMERATION MACHINE

Background. *It is possible to improve the quality indicators of high-fluxed agglomerate and the productivity of sintering machines by improving the technology of preparation and sintering of the charge. Loading the charge onto sinter machine pallets is the final stage of preparation. The efficiency of sintering depends on it in many ways. Determining and justifying the rational parameters of the sintered layer formed on pallets will allow developing recommendations for upgrading the technology for loading high-fluxed charge.*
Materials and/or methods. *To obtain data on the behavior characteristics of the charge at all stages of reloading operations and to study the gas permeability of the layer along the width of the pallet, laboratory and industrial studies were conducted using original methods. Sieve analysis of wet charge was performed using a unique technique that excludes significant loss of charge humidity and its destruction during sieving on wire sieves.*
Results. *Analysis of data from industrial research carried out in the agglomeration shop of the Yenakiyevo metallurgical plant allowed formulating rational parameters of the high-fluxed charge layer formed on pallets. These parameters are:*
– the height of the layer of high-fluxed charge on pallets is not less than 300...350 mm;
– identical granulometric, chemical compositions and gas dynamic properties of the charge layer along the width of the agglomeration machine;
– rational distribution of the particle size of the charge and solid fuel by layer height;
– stabilization of the bulk density of the charge in the height and width of the layer.
Conclusion. *The choice of the rational parameters of the high-fluxed charge layer allows ensuring optimal gas-dynamic and temperature-thermal modes of sintering, achieving the set indicators for the volume of production and quality of the sinter. Justification for the specific production conditions of the layer parameters makes it possible to develop measures to modernize the technology of loading high-fluxed charge on the sintering machine.*

Keywords: *agglomerate, high-fluxed charge, layer height, granulometric composition, fuel, bulk density.*

Сведения об авторах

И.М. Мищенко
Телефон: +380 (71) 412-25-04
Эл. почта: mim37@mail.ru

А.В. Кузин
SPIN-код: 4470-0976
Author ID: 7102276525
Researcher ID: P-8105-2015
ORCID iD: 0000-0002-5369-433
Телефон: +380 (62) 310-08-42
Эл. почта: yarosh@fizmet.donntu.org

А.В. Полохин
Телефон: +380 (62) 529-30-55
Эл. почта: Andrey.Polokhin@emzsteel.com

Я.Ю. Асламова
SPIN-код: 4394-4216
Телефон: +380 (71) 398-60-39
Эл. почта: aslamova_yana@mail.ru

Н.Н. Коробкин
Телефон: +380 (62) 529-22-31
Эл. почта: Nikolay.Korobkin@emzsteel.com

Статья поступила 19.03.2020 г.
© И.М. Мищенко, Я.Ю. Асламова, А.В. Кузин, Н.Н. Коробкин, А.В. Полохин, 2020
Рецензент д.т.н., проф. А.Б. Бирюков

УДК 621.771.011

А.В. Яковченко /д.т.н./, С.А. Снитко /д.т.н./, В.В. Пилипенко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
Н.И. Ивлева
(Донецк)

ЗАВИСИМОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ СТАЛИ 0,19С-0,20Si-0,40Mn, УЧИТЫВАЮЩАЯ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ ПРОЦЕССЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СТРУКТУРЫ

Получена зависимость для расчета напряжения течения углеродистой стали (0,19С-0,20Si-0,40Mn), учитывающая процессы динамического преобразования структуры при прокатке. Создана компьютерная база цифровой информации об экспериментальных кривых течения этой стали. Анализ точности аппроксимации экспериментальной информации на основе полученной зависимости для широкого диапазона изменения степени деформации ε (true strain), равном 0,03…1,65, показал, что относительная погрешность находится в диапазоне 1,2…15,1 %, а средняя относительная погрешность составляет 5 %. Проверка адекватности модели с помощью критерия Фишера дала удовлетворительный результат.

***Ключевые слова**: зависимость для расчета напряжения течения металла, динамическое преобразование структуры, экспериментальные кривые течения, сплайн-интерполяция, теория планируемого эксперимента.*

Постановка проблемы

При разработке рациональных технологических процессов горячей прокатки колец важными вопросами являются расчеты деформированного состояния металла и энергосиловых параметров. Напряжение течения металла σ является одной из главных составляющих по степени влияния на результаты таких расчетов. Зависимость напряжения течения металла, полученная без учета процессов динамического преобразования структуры, дает в основном завышенные результаты, что также негативно сказывается на точности конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец. В связи с этим актуально разработать зависимость напряжения течения стали 0,19С-0,20Si-0,40Mn с учетом динамического преобразования структуры.

Анализ последних исследований и публикаций

Основой при определении напряжения течения металла является экспериментальная информация, которая в большинстве случаев представлена в технической литературе в виде кривых $\sigma=f(\varepsilon,U,T)$ [1,2]. Известные методы расчета напряжения течения металла σ созданы для моделирования процессов, в которых степень деформации ε, как правило, не превышает 0,5 (соответственно величина (степень) суммарной относительной или истинной (логарифмической) деформации не превышает 0,7). Основными из них являются методы В.И. Зюзина [2], В.А. Николаева [3], Л.В. Андреюка [4] и др.

Теоретические исследования процессов прокатки колец показали, что накопленная деформация за один технологический переход в отдельных элементах профиля может достигать единицы и более.

Известно, что использование известных методов расчета напряжения течения металла σ в зависимости от степени деформации ε, скорости деформации U и температуры T при увеличенных значениях степени деформации, превышающих ε=0,5, в основном приводит к получению существенно завышенных результатов [5, 6]. Это объясняется тем, что в процессе экстраполяции значений σ в направлении повышения степени деформации не учитывается разупрочнение металла, связанное с его динамической рекристаллизацией.

Цель (задачи) исследования

В работе поставлена задача определения параметров зависимости для расчета напряжения течения металла σ на базе теории [6], в которой учитываются химический состав углеродистых сталей, температура, скорость деформации, накопленная деформация в рассматриваемой точке очага деформации, а также процессы динамического преобразования структуры металла

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

в процессе его горячей прокатки. Планируется также выполнить проверку адекватности указанной зависимости, необходимой для реализации конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец.

Основной материал исследования

При моделировании на базе теории [6] используется концепция напряжения течения, в соответствии с которой материал деформируется пластически, а сумма напряжений определяется в зависимости от пошаговой суммы деформаций по кривой течения.

Параметры указанной зависимости разработаем для стали, имеющей следующий химический состав, %: C(0,19); Si(0,2); Mn(0,4); Cr(0,11); P(0,019); S(0,011); Cu(0,16). Выбор этой стали связан, во-первых, с необходимостью конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец из углеродистых марок сталей и, во вторых, в связи с имеющимися в работе [7] для указанного химического состава стали экспериментально полученных кривых течения, причем в достаточно широком диапазоне изменения степени деформации ε (true strain), равном 0,02…1,65. В работе [7] принято следующее обозначение: сталь 0,19C-0,20Si-0,40Mn, которое и будет использоваться в дальнейшем.

Экспериментальные кривые течения стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn [7] показаны на рис. 1 в окне программы [8] задания исходной информации при создании соответствующей компьютерной базы цифровой информации. Это стало возможным в связи с тем, что отсканированная графическая информация, включающая кривые течения, была занесена в соответствующую папку и задана в качестве исходной информации.

На рис. 2 показано окно построения координатной сетки в соответствии с методикой, предложенной в работе [8]. В этом окне для всех узловых точек координатных осей ставятся в соответствие значения σ и ε в единицах, указанных на координатных осях, а также в единицах растрового изображения, которые определяются программно. При этом в результирующую таблицу автоматически заносятся значения абсцисс узловых точек в единицах растрового изображения, а на самом рисунке вычерчиваются вертикальные линии. Аналогичные действия выполняются и для оси ординат. Графическая визуализация построенных линий необходима для обеспечения максимально точного совпадения построенной сетки, выполненной другим цветом, с исходной координатной сеткой.

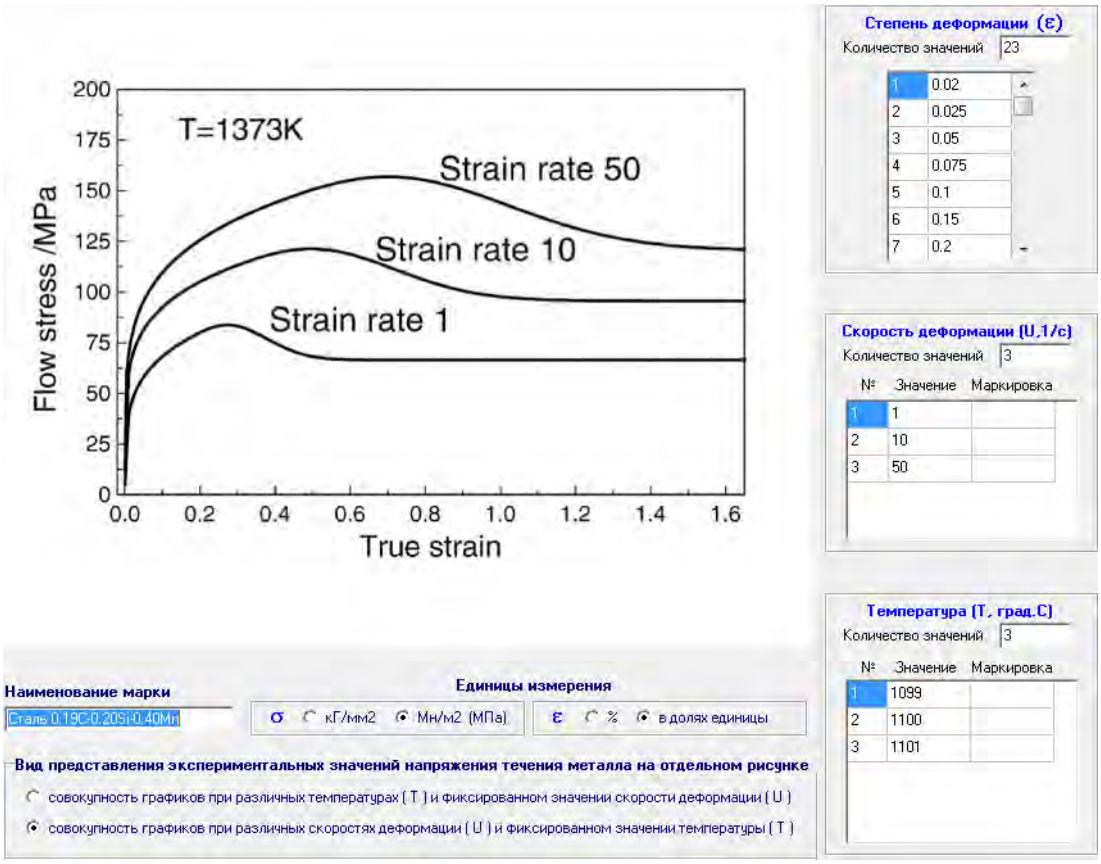


Рис. 1. Окно программы задания исходной информации при создании компьютерной базы цифровой информации о кривых течения для стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn

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

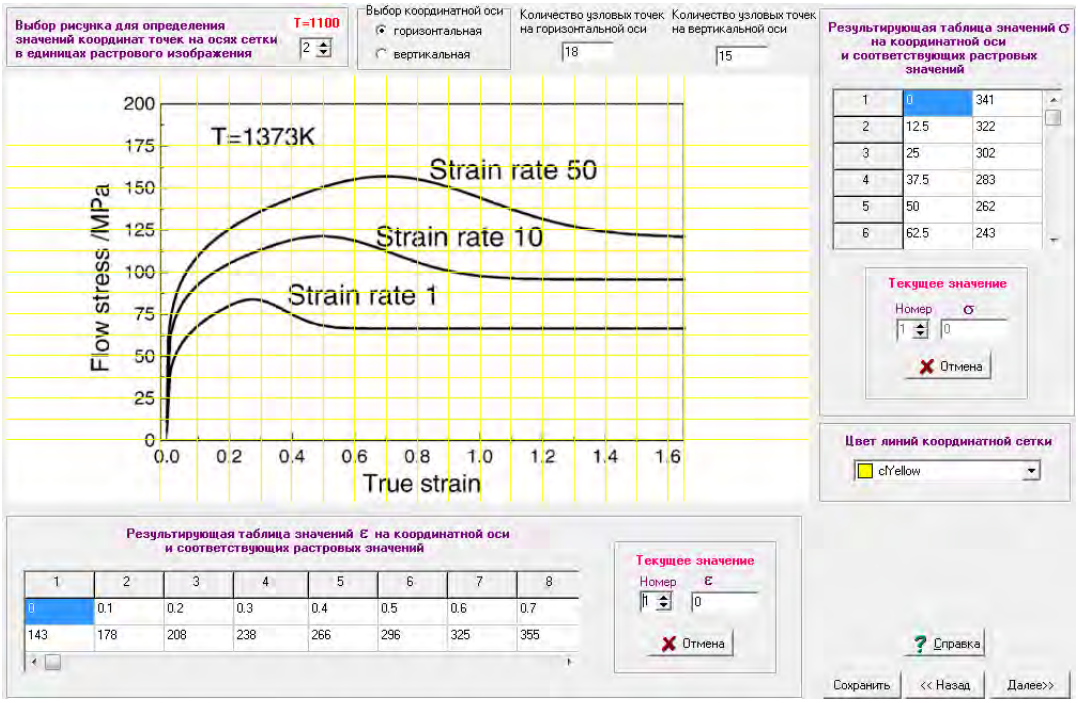


Рис. 2. Окно построения координатной сетки

На основе полученной информации для любой точки, лежащей на графике, можно определить абсциссу и ординату в растровых единицах, а затем рассчитать их в единицах, указанных на координатных осях [8].

Для этого разработано окно программы, показанное на рис. 3 [8]. В правом верхнем углу окна имеются переключатели для выбора текущих значений ε, *U*, *T*. На точку кривой, полученную пересечением с вертикальной осью и соответствующую выбранным значениям факторов, необходимо навести курсор и щелкнуть левой кнопкой мыши. Программа вычисляет значение напряжения течения металла σ, а после нажатия кнопки «Поместить в таблицу» заносит его в соответствующую ячейку таблицы, показанную на рис. 3.

Далее выполняется сплайн-интерполяция полученной информации и построение сплайн-кривых в окне рис. 3.

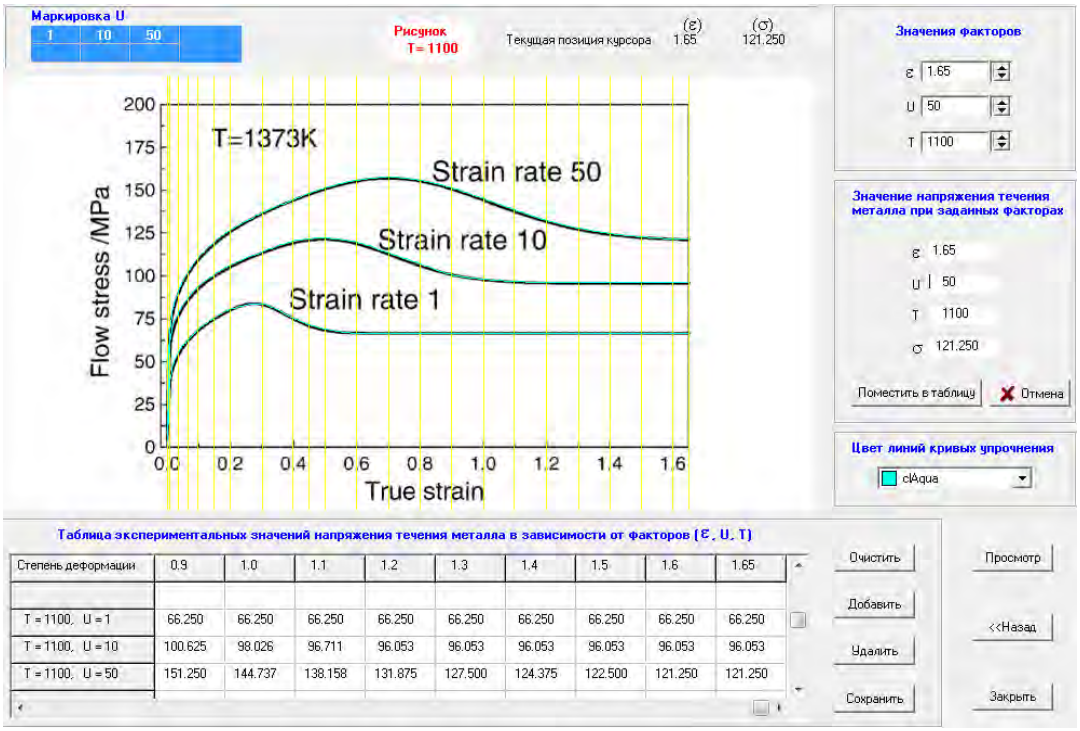


Рис. 3. Окно снятия экспериментальной информации и контрольного построения сплайн-кривых течения стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn

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

Таблица экспериментальных значений напряжения течения металла σ (МПа) в зависимости от факторов: ε , U (1/c), T(град.C)

Степень деформации	0.02	0.025	0.05	0.075	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.45	0.5	0.6
T = 1099, U = 1	17.150	35.825	55.463	62.700	68.325	75.200	80.200	83.325	75.200	71.450	68.950	66.450
T = 1099, U = 10	40.800	56.779	78.325	87.075	93.621	100.825	106.450	113.950	120.200	121.450	122.075	119.575
T = 1099, U = 50	52.200	62.700	90.989	102.700	110.200	119.575	126.450	136.450	144.279	148.226	151.450	155.825
T = 1100, U = 1	16.950	35.625	55.263	62.500	68.125	75.000	80.000	83.125	75.000	71.250	68.750	66.250
T = 1100, U = 10	40.600	56.579	78.125	86.875	93.421	100.625	106.250	113.750	120.000	121.250	121.875	119.375
T = 1100, U = 50	52.000	62.500	90.789	102.500	110.000	119.375	126.250	136.250	144.079	148.026	151.250	155.625
T = 1101, U = 1	16.750	35.425	55.063	62.300	67.925	74.800	79.800	82.925	74.800	71.050	68.550	66.050
T = 1101, U = 10	40.400	56.379	77.925	86.675	93.221	100.425	106.050	113.550	119.800	121.050	121.675	119.175
T = 1101, U = 50	51.800	62.300	90.589	102.300	109.800	119.175	126.050	136.050	143.879	147.826	151.050	155.425
Степень деформации	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.65
T = 1099, U = 1	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450
T = 1099, U = 10	119.575	113.325	107.075	100.825	98.226	96.911	96.253	96.253	96.253	96.253	96.253	96.253
T = 1099, U = 50	155.825	157.700	155.825	151.450	144.937	138.358	132.075	127.700	124.575	122.700	121.450	121.450
T = 1100, U = 1	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250
T = 1100, U = 10	119.375	113.125	106.875	100.625	98.026	96.711	96.053	96.053	96.053	96.053	96.053	96.053
T = 1100, U = 50	155.625	157.500	155.625	151.250	144.737	138.158	131.875	127.500	124.375	122.500	121.250	121.250
T = 1101, U = 1	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050
T = 1101, U = 10	119.175	112.925	106.675	100.425	97.826	96.511	95.853	95.853	95.853	95.853	95.853	95.853
T = 1101, U = 50	155.425	157.300	155.425	151.050	144.537	137.958	131.675	127.300	124.175	122.300	121.050	121.050

Рис. 4. Компьютерная база цифровой информации о кривых течения стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn

Цвет интерполяционных кривых пользователь выбирает таким образом, чтобы их было хорошо видно на фоне исходных кривых.

Таким образом, разработана компьютерная база цифровой информации (рис. 4) о кривых течения стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn, показанных на рис. 1. Изложенная выше методика ее создания, разработанная в [8], основывается на наиболее точном описании экспериментальных кривых течения соответствующими сплайн-кривыми.

В работе [8] изложен метод автоматизированного определения напряжения течения металла σ в зависимости от фиксированных значений степени деформации ε, скорости деформации U и температуры T, основанный на использовании компьютерных баз цифровой информации для сталей и сплавов.

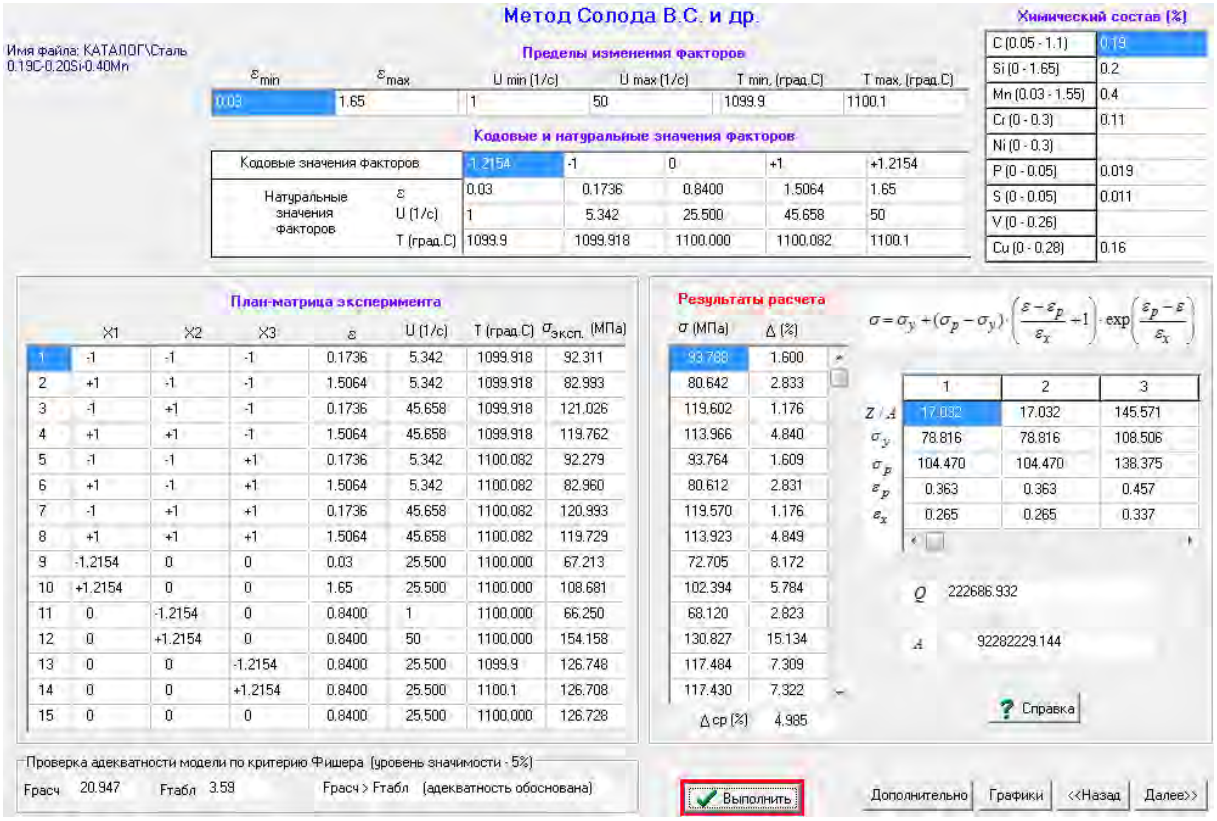
На рис. 5а показано окно компьютерной программы определения параметров зависимости для расчета напряжения течения металла σ на базе теории [6]. Указанная зависимость представлена в правой части окна. Основные формулы для расчета этих параметров, представленные в работе [6], показаны на рис. 5б. Здесь σ_y, σ_p, ε_p, и ε_x – термокинетические параметры: σ_p – пиковое значение напряжения σ на кривой течения, соответствует пиковой деформации ε_p; σ_y – установившееся напряжение, при котором наступает равновесие процессов упрочнения и динамической рекристаллизации при достижении деформации ε_x.

Влияние химического состава стали отражается величиной энергии активации деформации Q (кДж·моль$^{-1}$), которая входит в комплексный температурно-скоростной параметр процесса деформации (параметр Zener-Hollomon (z), A – скоростная константа деформируемого материала [6].

Актуальной задачей является выполнение научно обоснованного анализа точности зависимости для расчета напряжения течения металла σ, для которой в окне программы (рис. 5а) определены искомые термокинетические параметры применительно к стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn.

В работе [8] создана компьютерная программа, которая на первом этапе в автоматизированном режиме формирует план-матрицу эксперимента, обеспечивающую научно обоснованный выбор наиболее рациональных точек в области изменения факторов ε, U, T, а на следующем – определяет соответствующие экспериментальные значения $\sigma_{эксп}$. Метод автоматизированного определения экспериментальных значений напряжения течения металла σ [8] в зависимости от фиксированных значений степени деформации ε, скорости деформации U и температуры T основан на использовании компьютерной базы цифровой информации.

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



а

где $\sigma_p = 72{,}06 \cdot (Z/A)^{0{,}131}$, $\sigma_y = 51{,}66 \cdot (Z/A)^{0{,}149}$,

$\varepsilon_x = 0{,}193 \cdot (Z/A)^{0{,}112}$, $\varepsilon_p = 0{,}268 \cdot (Z/A)^{0{,}107}$.

$$Z = U \cdot \exp\left[Q/(R \cdot T)\right],$$

где $R = 8{,}318$ Дж-моль$^{-1}$·К$^{-1}$ - газовая постоянная; T - абсолютная температура.

$$Q = 308700 + 37100 \cdot ln(C\%) + 10900 \cdot ln(C\%)^2 + 27000 \cdot (Si\%) + \\ + 8100 \cdot (Mn\%) + 337100 \cdot (Cr\%) + 249900 \cdot (Ni\%) - 119000 \cdot (Cu\%) - \\ - 181000 \cdot (V\%) - 288000 \cdot (P\%) - 855000 \cdot (S\%)$$

$$A = 0{,}146 \cdot exp\left(9{,}1 \cdot 10^{-5} \cdot Q\right)$$

б

Рис. 5. Окна программы определения термокинетических параметров зависимости для расчета напряжения течения металла на базе теории [6] и проверки ее адекватности: *а* – окно планирования эксперимента; *б* – формулы для расчета термокинетических параметров

С применением центрального композиционного ортогонального планирования разработана план-матрица в виде, показанном на рис. 5а. Из компьютерной базы цифровой экспериментальной информации для стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn (см. рис. 4) в таблицу, расположенную в верхней части окна (см. рис. 5а), передаются пределы изменения факторов ε, *U*, *T*, которые в случае необходимости могут быть изменены. В этом же окне формируется таблица кодовых и натуральных значений факторов.

План-матрица содержит 15 строк (опытов) для определения величин σ при указанных в них сочетаниях значений факторов ε, *U*, *T*. Последняя колонка план-матрицы содержит значения напряжения течения металла $\sigma_{эксп}$, которые определены с использованием компьютерной базы цифровой экспериментальной информации для стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn (рис. 5а), а также метода и программы, представленных в [8]. Указанные метод и программа были созданы для условий, когда задаются пределы изменения каждого из трех факторов. Поэтому в решаемой задаче задана не фиксированная температура, равная 1100 °С, а интервал в диапазоне 1100±0,1 °С.

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

Выполнена разработка функций компьютерной программы определения соответствующих расчетных значений $\sigma_{расч}$ для каждого из 15-ти опытов на основе зависимостей, показанных на рис. 5а, 5б. С учетом значений $\sigma_{эксп}$ в окне программы (см. рис. 5а) для стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn определили относительную погрешность для каждого из 15-ти опытов, которая находится в диапазоне 1,2…15,1 %, и среднюю относительную погрешность по всему планируемому эксперименту, которая составила 5 %.

Проверка адекватности модели с помощью критерия Фишера также реализована в компьютерной программе, окно которой показано на рис. 5а. Указанная проверка дала удовлетворительный результат.

Выполнена разработка функций компьютерной программы расчета и построения зависимостей напряжения течения металла ($\sigma_{расч}$ и $\sigma_{эксп}$) от степени деформации ε при фиксированных значениях скорости деформации U и температуры T. Результаты, представленные на рис. 6, позволяют сделать вывод о том, что в диапазонах скорости деформации 1…50 c^{-1} и степени деформации 0,03…1,65 кривые, построенные по расчетным данным, адекватно описывают экспериментальные кривые течения для стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn.

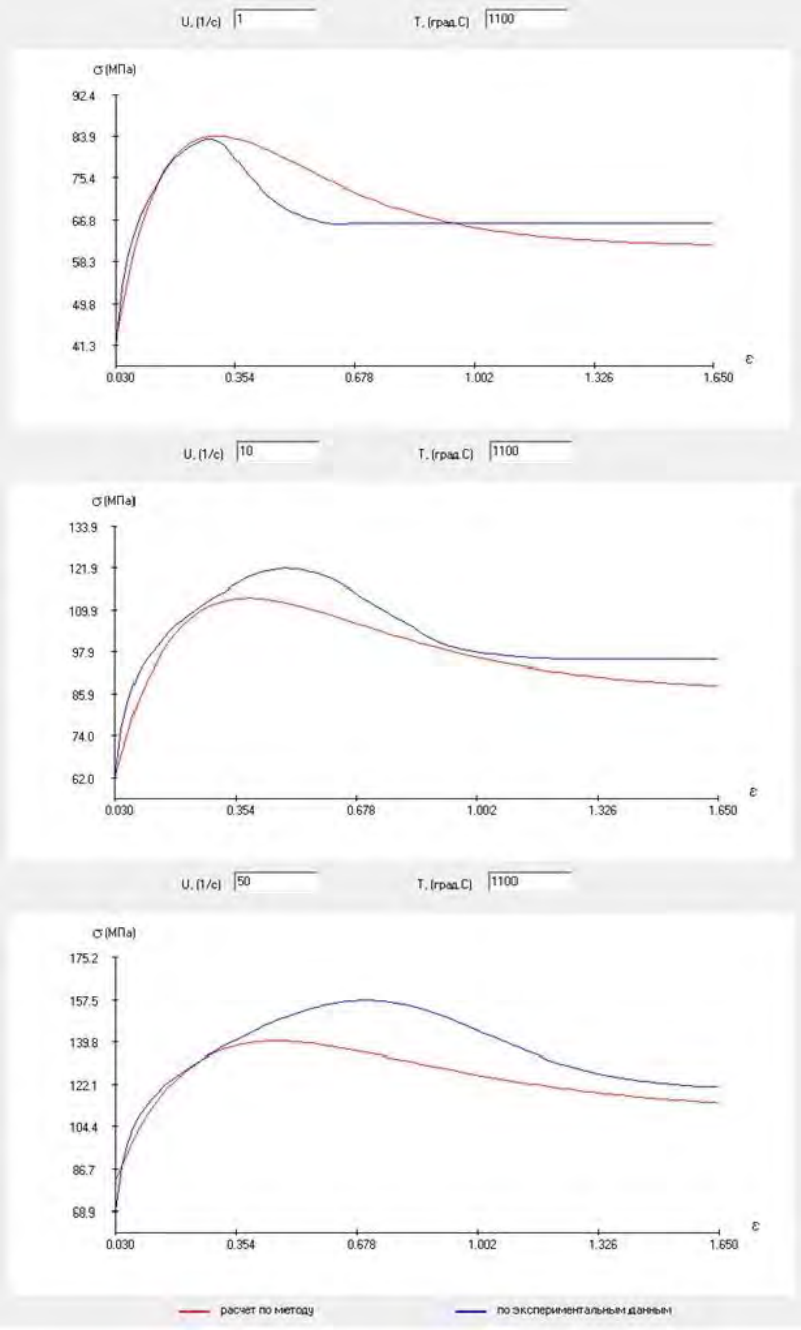


Рис. 6. Расчетные $\sigma_{расч}$ и экспериментальные $\sigma_{эксп}$ зависимости напряжения течения стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn от степени деформации ε при фиксированных значениях U и T

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

Выводы

Установлено, что зависимость для расчета напряжения течения металла, разработанная на базе теории, учитывающей химический состав углеродистой стали (0,19C-0,20Si-0,40Mn), температуру, скорость деформации, накопленную деформацию в рассматриваемой точке очага деформации, а также процессы динамического преобразования структуры металла при его горячей пластической деформации, адекватно описывает экспериментальные кривые течения для широкого диапазона изменения степени деформации ε (true strain), равного 0,03… 1,65, и может использоваться для конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец.

Список литературы

1. Полухин, П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1976. – 488 с.
2. Теория прокатки: справочник / А.И. Целиков [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
3. Теория и практика процессов прокатки: учеб. пособие. – Запорожье: ЗГИА, 2002. – 232 с.
4. Андреюк, Л.В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава / Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев, Б.С. Прицкер // Сталь. – 1972. – №6. – С. 522-523.
5. Снитко, С.А. Влияние параметров конечно-элементных моделей на точность расчета формоизменения металла и сил при штамповке и прокатке заготовок железнодорожных колес / С.А. Снитко, А.А. Дужуржи // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр., 2010. – Вып.1(22). – С. 44-48.
6. Солод, В.С. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей / В.С. Солод, Я.Е. Бейгельзимер, Р.Ю. Кулагин // Металл и литье Украины. – 2006. – №7-8. – С. 52-56.
7. Yanagida, A. A novel approach to determine the kinetics for dynamic recrystallization by using the flow curve / A. Yanagida, J. Yanagimoto // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Iss.1-3. Vol.151. – P.33-38.
8. Яковченко, А.В. Методы компьютерного моделирования напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации: учеб. пособие для обучающихся образоват. учреждений высш. проф. образования / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, Н.И. Ивлева. – Донецк: ДОННТУ, 2018. – 197 с.

A.V. Yakovchenko /Dr. Sci. (Eng.)/, S.A. Snitko / Dr. Sci. (Eng.)/, V.V. Pilipenko
Donetsk National Technical University (Donetsk)
N.I. Ivleva
(Donetsk)

THE FUNCTION OF THE FLOW STRESS OF STEEL 0.19C-0.20Si-0.40Mn WITH ACCOUNTING THE PROCESSES OF DYNAMIC TRANSFORMATION OF THE STRUCTURE DURING HOT ROLLING

Background. *Calculations of the deformed state of the metal and energy-power parameters are essential issues when developing rational technological processes for hot rolling of rings. The metal flow stress σ is one of the main factors that influence the results of such calculations. The dependence of the metal flow stress, obtained without taking into account the processes of dynamic transformation of the structure, gives generally inflated results, which also negatively affects the accuracy of finite element modelling of ring rolling processes. In this regard, it is necessary to develop the dependence of 0.19C-0.20Si-0.40Mn steel flow stress, taking into account the dynamic transformation of the structure.*

Materials and/or methods. *The thermokinetic parameters of the dependence for calculating the steel flow stress (0.19C-0.20Si-0.40Mn) are determined based on the theory that takes into account the processes of dynamic transformation of the structure in the rolling processes. The method for automated determination of the metal flow stress based on experimental flow curves is used. The accuracy of the experimental information approximation based on the obtained dependence is determined based on the spline interpolation of the practical information and the theory of the planned experiment. The model adequacy test performed using the Fischer F-test for the case of multidimensional regression.*

Results. *The dependence for calculating the flow stress of carbon steel (0.19C-0.20Si-0.40Mn) obtained accounting the processes of dynamic transformation of the structure during rolling. A computer database of digital information about experimental flow curves of this steel created. Analysis of the*

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

accuracy of approximation of preliminary information based on the obtained dependence for a wide range of changes in the degree of deformation (true strain), equal to 0.03…1.65, showed that the relative error is in the field of 1.2…15.1 %, and the average relative error is 5 %. Checking the adequacy of the model using the Fischer criterion gave a satisfactory result.

Conclusion. *The dependence for calculation of the stress of the metal flow developed following the theory which takes into account the chemical composition of carbon steel (0.19C-0.20Si-0.40Mn), temperature, strain rate, accumulated strain in the point of deformation and dynamic processes of transformation of the metal structure under its hot plastic deformation, adequately describes the experimental flow curves for a wide range of variation degrees of deformation (true strain) equal to 0,03…1.65 and can be used for finite element modelling of ring rolling processes.*

Keywords: *dependence for calculating the metal flow stress, dynamic transformation of the structure, experimental flow curves, spline interpolation, theory of the planned experiment.*

Сведения об авторах

А.В. Яковченко
SPIN-код: 1314-1795
Author ID: 850425
ORCID iD: 0000-0003-2320-9504
Телефон: +380 (71) 334-82-35
Эл. почта: mond1991@mail.ru

В.В. Пилипенко
SPIN-код: 9290-0787
Author ID: 1030563
ORCID iD: 0000-0002-6132-5605
Телефон: +380 (71) 414-20-36
Эл. почта: VictorPilipenkoDNTU@gmail.com

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

Н.И. Ивлева
Телефон: +380 (62) 304-33-77
Эл. почта: ivl22@mail.ru

Статья поступила 31.01.2020 г.
© А.В. Яковченко, С.А. Снитко, В.В. Пилипенко, Н.И. Ивлева, 2020
Рецензент д.т.н., проф. А.А. Троянский



УДК:669.046.55:669.14

А.Я. Бабанин /д.т.н./, Б.Ф. Белов /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (Макеевка)
А.Г. Пономаренко /д.т.н./, Д.В. Первухин
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
А.Я. Минц, И.А. Абакумов
ГП «Юзовский металлургический завод» (Донецк)

КЛАССИФИКАЦИЯ И СТРУКТУРИЗАЦИЯ СИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ

Выполнена и представлена классификация по химическому составу и структуризация по структурному состоянию, представленная в виде СИМ-комплексов, жидких и твердых силикатов кальция. Представленная классификация и структуризация силикатов кальция характеризует структурно-химическое состояние во всем интервале концентраций исходных компонентов данной системы, а применение результатов исследований позволяет оптимизировать состав шихтовых материалов для получения заданного состава сплавов силикокальция и его продуктов раскисления, образующих неметаллические включения в стали.

Ключевые слова: *силикаты кальция, классификация и структуризация, оксидная система.*

Постановка проблемы

Силикаты кальция являются термодинамической системой процессов восстановления оксидных фаз для получения заданного состава сплавов силикокальция и окисления сплавов силикокальция при раскислении стали. Оксидная система $CaO\text{-}SiO_2$ подробно изучена [1,2] методами термодинамического анализа, что недостаточно для исследований механизма образования и структурного состояния силикатных фаз как основных компонентов металлургических шлаков.

Исследование и изучение оксидной $CaO\text{-}SiO_2$-системы на предмет изменения ее структурно-химического состояния при температурах жидкого металла применительно к разработке более наукоемких и эффективных технологий рафинирования и микролегирования стали для перевода их качества на более высокий уровень является актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время имеющиеся данные по результатам исследования вышеуказанной системы основаны на закономерностях химической термодинамики [3,4], лежащей в основе существующего классического материаловедения, не раскрывают механизма структуризации. Квантовое материаловедение исследует металлургические процессы, протекающие в стохастических системах на наноуровне структурных элементов. Наноструктурные элементы определяют форму и размер неметаллических включений заданного состава в жидком и твердом состояниях [5], влияющих на уровень качества механических и служебных свойств металлопродукции.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является исследование структурно-химического состояния оксидной $CaO\text{-}SiO_2$-системы в соответствии с квантовым материаловедением на основе теории МГС-фаз [6] с учетом квантово-механических параметров атомов (ионов), образующих силикаты кальция.

Основной материал исследования

В данной работе структурно-химическое состояние оксидной системы исследовано с помощью полигональных диаграмм состояния бинарной $CaO\text{-}SiO_2$-системы, построенной графоаналитическим методом (ПДС-метод [7]) во всем интервале твердых и жидких исходных компонентов.

ПДС-метод соответствует правилу фаз Гиббса, когда в качестве исходных компонентов выступают валентные электроны атомов (ионов), определяющие тип связи химических реакций как химические потенциалы электронов в коллективизированных системах [8…11].

Системным классификатором силикатов кальция является полигональная диаграмма системы $CaO\text{-}SiO_2$, построенная ПДС-методом и представленная на рис. 1.

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

ПДС $CaO-SiO_2$ включает последовательный ряд 12-ти промежуточных фаз: $CaO \rightarrow 12CaOSiO_2(12C) \rightarrow 6CaOSiO_2(6C) \rightarrow 4CaOSiO_2(Э_1) \rightarrow 3CaOSiO_2(АЛ) \rightarrow 2CaOSiO_2(БЛ) \rightarrow 3CaO2SiO_2$ $(Э_2) \rightarrow CaOSiO_2(ВЛ) \rightarrow 2CaO3SiO_2(Э_3) \rightarrow CaO2SiO_2$ $(2К) \rightarrow CaO3SiO_2(M_2) \rightarrow CaO6SiO_2(M) \rightarrow CaO24SiO_2$ $(M_1) \rightarrow SiO_2$.

На ординатах исходных компонентов обозначены температуры структурных переходов в твердом и жидком состояниях, которые различаются как термические и концентрационные. Последние возникают в результате химических взаимодействий исходных компонентов и промежуточных фаз.

Для SiO_2 термические структурные превращения при температурах – в точках $К_1$(875 °С) → $К_4$(1475 °С) → $К_5$(1600 °С) → $К_6$(2000 °С) → $К_7$(2700 °С), концентрационные (химические) – в точках $К_2$(1125 °С, ВЛ), $К_3$(1350 °С, $Э_3$). Критическая точка купола несмешиваемости (L_M) двух монотектических жидкостей L_{M2} и L_{M1} – при температуре 2100 °С (т. $М^o$). Для CaO на рис. 1 показаны точка $С_4$ – температура плавления (2600 °С) и концентрационные $С_1$ (875 °С, БЛ) → $С_2$(1250 °С, АЛ).

Ликвидус – жирная линия, проходящая через сингулярные точки $С_3 \rightarrow 6С \rightarrow Э_1 \rightarrow АЛ^o \rightarrow БЛ^o \rightarrow Э_2 \rightarrow ВЛ^o \rightarrow Э_3 \rightarrow 2К \rightarrow М_2 \rightarrow М_1 \rightarrow К_5$, в которых плавятся исходные компоненты и промежуточные фазы, существующие в жидком состоянии.

Область гомогенности полиэдрической ($L_C^{ПД}$) и полигональной ($L_C^{ПГ}$, $L_К^{ПГ}$) жидкости исходных компонентов и промежуточных фаз: $Э_1^{Ж} \rightarrow L_{АЛ} \rightarrow L_{БЛ} \rightarrow Э_2^{Ж} \rightarrow L_{ВЛ} \rightarrow L_{2К} \rightarrow L_{M2} \rightarrow L_M \rightarrow L_{M1}$. В сингулярных точках линии ликвидуса образуются полиэдрические жидкости, тогда как над куполом несмешиваемости – разупорядоченная жидкость ($L^{раз}_M$).

Промежуточные фазы силикатов кальция [13] образуются в твердом или жидком состояниях и плавятся инконгруэнтно или конгруэнтно. Эвтектики ($Э_1$, $Э_2$, $Э_3$), монотектики (M_1, M_2) и сингулярные фазы плавятся конгруэнтно с образованием полиэдрической жидкости. Сингулярные фазы $6CaOSiO_2$ (6С,61), $3CaOSiO_2$ (АЛ, 3.1), $2CaOSiO_2$ (БЛ, 2.1) и $CaOSiO_2$ (ВЛ, 1.1) образуются в твердом состоянии и существуют в двух модификациях (α, β), которые при температурах ниже точки образования промежуточных фаз распадаются на твердые растворы переменного состава в двухструктурном состоянии ($Д_{6С}$, $Д_{АЛ}$, $Д_{БЛ}$, $Д_{ВЛ}$), как и другие сингулярные фазы ($Д_{2К}$, $Д_M$, $Д_{M1}$, $Д_{M2}$) и ($Э_1^T$, $Э_2^T$, $Э_3^T$), которые распадаются на исходные компоненты.

По справочным данным, рис. 1 [13], существуют $3CaOSiO_2$ (АЛ – алит)→$2CaOSiO_2$ (БЛ – белит)→$3CaO2SiO_2$ (РН – ранкинит)→$CaOSiO_2$ (ВЛ – волластонит) и три эвтектики. Купол несмешиваемости замыкается при 2100 °С с содержанием CaO 12,0 %. Температуры образования и плавления алита и белита не установлены [14].

В табл. 1 приведена классификация силикатов кальция, которые условно обозначены двухзначными числами, отвечающими стехиометрическим коэффициентам промежуточных фаз – первые цифры для CaO, вторые – SiO_2.

В табл. 2 представлены СИМ-комплексы для жидких силикатов кальция. Для силикатов, образующихся в твердом и существующих в жидком состоянии, структуры представлены полигональными ячейками (ПГЯ).

ПГЯ – это полимерные сетки, центрально-симметричные относительно сеткообразующих катионов кремния (Si^{4+}), объединенных мостиковыми связями ионов кислорода (O^{2-}) с ионами кальция (Ca^{2+}), замыкающих сетку. Геометрические параметры СИМ-комплексов рассчитаны из орбитальных радиусов ионов кремния, кислорода и кальция по радиально-орбитальной модели электронного строения атомов (теория РОМ-атом) (длина ПГЯ, нм, площадь $S_{ПГЯ}$, $нм^2$). Плотность упаковки ПГЯ (S_o), рассчитанная из приведенной площади к числу частиц в СИМ-комплексах, характеризует стабильность промежуточных фаз и последовательность их образования.

Первичная фаза характеризуется минимальным числом частиц (N) и максимальной плотностью упаковки, т.е. минимальными значениями S_o. Таким условиям отвечает двухкальциевый силикат $2CaOSiO_2$ (БЛ – белит) при $N_{ПГЯ}$=7 и S_o=0,0126.

По известным экспериментальным данным [14], эта первичная фаза образуется при температурах, превышающих 600 °С.

Первичная фаза на полигональной диаграмме условно разделяет ее на две подсистемы, в которых образуются вторичные фазы, последовательность образования которых также определяется по численным значениям относительной плотности упаковки полигональных (для жидкости) и полиэдрических (для кристалла) ячеек.

Результаты данных исследований были опробованы и подтверждены для повышения рафинировочной способности ковшевого шлака в условиях агрегатов ковш-печь ПАО «МК «Азовсталь» и Днепровского металлургического комбината им. Дзержинского.

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

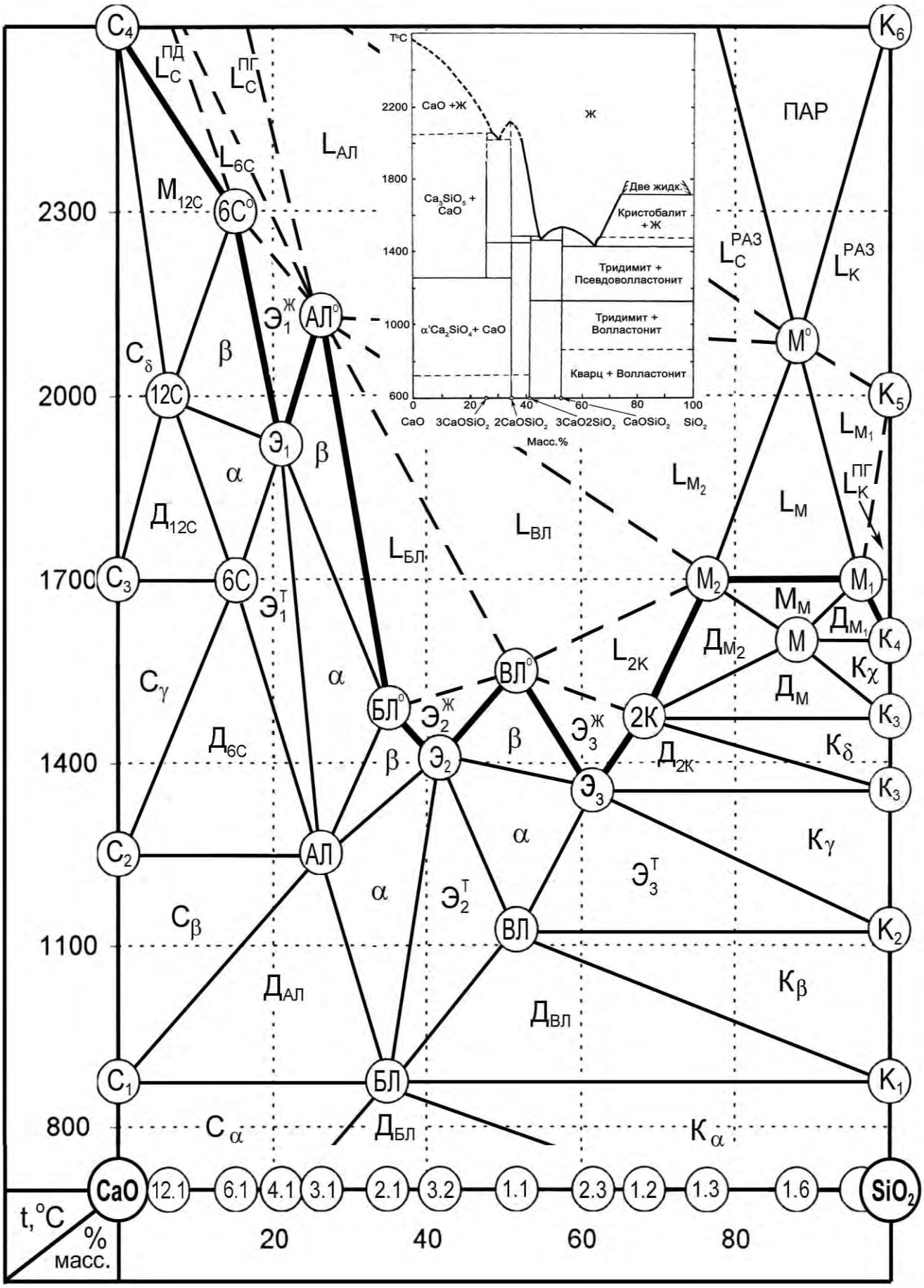


Рис. 1. Полигональная диаграмма состояния системы CaO-SiO_2 [13]

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

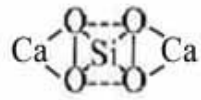
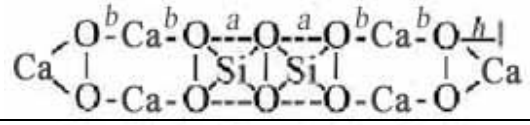
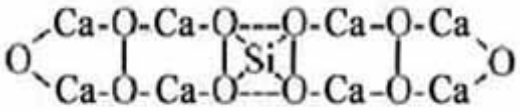
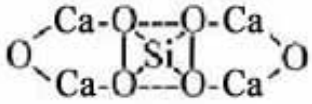
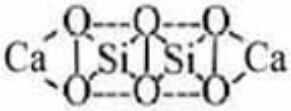
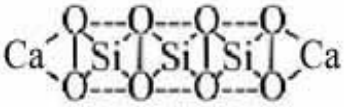
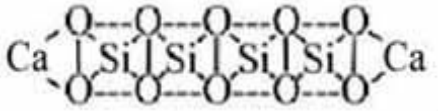
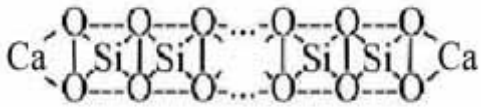
Табл. 1. Классификация промежуточных фаз системы $CaO-SiO_2$

№ п/п	Линейные системы	Промежуточные фазы						
		Химические реакции	Стехиометрический состав	Условн. обозначения	SiO_2, масс. %	CaO/SiO_2	Температура, °С*	
							образов.	плавл.
1	$CaO-SiO_2$	$2CaO+SiO_2 \leftrightarrow 2CaOSiO_2$ $3(2CaOSiO_2) \leftrightarrow 3CaO2SiO_2+ 3CaOSiO_2$	$2CaOSiO_2$ (белит)	2.1(БЛ)	34,9	1,87	875 н.д.	1500 2130
2	SiO_2-$2CaOSiO_2$	$SiO_2 +2CaOSiO_2 \leftrightarrow 2(CaOSiO_2)$ $5(CaOSiO_2) \leftrightarrow 3CaO2SiO_2+2CaO3SiO_2$	$CaOSiO_2$ (волластонит)	1.1(ВЛ)	51,7	0,93	1125 1125	1550 1545
3	$CaOSiO_2$-$2CaOSiO_2$	$CaOSiO_2+2CaOSiO_2 \leftrightarrow 3CaO2SiO_2$	$3CaO2SiO_2$ (ранкинит)	3.2($Э_2$)	41,7	1,4	1400 1420	1400 1420
4	$CaOSiO_2$-SiO_2	$2(CaOSiO_2) +SiO_2 \leftrightarrow 2CaO3SiO_2$ $2(2CaO3SiO_2) \leftrightarrow CaO2SiO_2+CaOSiO_2$	$2CaO3SiO_2$	2.3($Э_3$)	61,6	0,62	1350 1400	1350 1400
5	$2CaO3SiO_2$-SiO_2	$2CaO3SiO_2+SiO_2 \leftrightarrow 2(CaO2SiO_2)$ $2(CaO2SiO_2) \leftrightarrow CaOSiO_2+CaO3SiO_2$	$CaO2SiO_2$	1.2(2К)	68,2	0,47	1475 н.д.	«-» н.д.
6	SiO_2-$CaO2SiO_2$	$4SiO_2+CaO2SiO_2 \leftrightarrow CaO6SiO_2$ $7(CaO6SiO_2) \leftrightarrow 6(CaO3SiO_2)+$ $+CaO24SiO_2$	$CaO6SiO_2$	1.6($М/М^0$)	86,5	0,16	1600 н.д.	1700/2100 2100
7	$CaO2SiO_2$-$CaO6SiO_2$	$3(CaO2SiO_2)+CaO6SiO_2 \leftrightarrow 4(CaO3SiO_2)$	$CaO3SiO_2$	1.3($М_2$)	76,3	0,31	1700 н.д.	1700 н.д.
8	SiO_2-$CaO6SiO_2$	$CaO6SiO_2+18SiO_2 \leftrightarrow CaO24SiO_2$	$CaO24SiO_2$	1.24($М_1$)	96,3	0,04	1700 н.д.	1700 н.д.
9	CaO-$2CaOSiO_2$	$CaO+2CaOSiO_2 \leftrightarrow 3CaOSiO_2$ $2(3CaOSiO_2) \leftrightarrow 4CaOSiO_2+2CaOSiO_2$	$3CaOSiO_2$ (алит)	3.1(3С)	26,3	2,8	1250 н.д.	2100 н.д.
10	CaO-$3CaOSiO_2$	$3CaO+3CaOSiO_2 \leftrightarrow 6CaOSiO_2$ $2(6CaOSiO_2) \leftrightarrow 4CaOSiO_2+8CaO$	$6CaOSiO_2$	6.1(6С)	15,2	5,58	1700 н.д.	2300 н.д.
11	$3CaOSiO_2$-$6CaOSiO_2$	$2(3CaOSiO_2)+6CaOSiO_2 \leftrightarrow 3(4CaOSiO_2)$	$4CaOSiO_2$	4.1($Э_1$)	21,1	3,73	1900 2000	1900 2000
12	CaO-$6CaOSiO_2$	$6CaO+6CaOSiO_2 \leftrightarrow 12CaOSiO_2$	$12CaOSiO_2$	12.1	8,2	11,2	2000 н.д.	«-» н.д.

Примечание: * – числитель – настоящие исследования, знаменатель – справочные данные [13]; н.д. – нет данных; «-» – инконгруэнтное плавление.

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

Табл. 2. Структуризация жидких и твердых силикатов кальция

№ п/п	Формульный состав		СИМ-комплексы
	Стехиометрический	Структурный	Геометрические параметры полигональных ячеек: a=0,20 нм, b=0,153 нм, h=0,12 нм
1	$2CaOSiO_2$ (ППФ)	$Ca_2Si_1O_4$ N=7, L=0,44 нм S_o=0,0126	
2	$3CaOSiO_2$	$Ca_6Si_2O_{10}$ N=18, L=1,252 нм S_o=0,0131	
3	$8CaOSiO_2$	$Ca_8Si_1O_{10}$ N=19, L=1,358 нм S_o=0,0143	
4	$4CaOSiO_2$ ($Э_1$)	$Ca_4Si_1O_6$ N=11, L=0,746 нм S_o=0,0136	
5	$CaOSiO_2$	$Ca_2Si_2O_6$ N=10, L=0,8 нм S_o=0,0128	
6	$2CaO3SiO_2$ ($Э_2$)	$Ca_2Si_3O_8$ N=13, L=0,64 нм S_o=0,0121	
7	$CaO2SiO_2$	$Ca_2Si_4O_{10}$ N=16, L=1,04 нм S_o=0,0130	
8	$CaO3SiO_2$ (M_2)	$Ca_2Si_6O_{14}$ N=22, L=1,44 нм S_o=0,0132	
9	$CaO6SiO_2$ (М)	$Ca_2Si_{12}O_{26}$ N=40, L=2,64 нм S_o=0,0132	

Примечание: N – число частиц, L – длина (нм), S_o – относительная плотность упаковки.

Выводы

Построена графоаналитическим методом полигональная диаграмма состояния системы CaO-SiO_2 во всем интервале концентраций твердых и жидких исходных компонентов, включающая последовательный ряд промежуточных фаз: $CaO \rightarrow 12CaOSiO_2(12C) \rightarrow 6CaOSiO_2(6C) \rightarrow 4CaOSiO_2(Э_1) \rightarrow 3CaOSiO_2(АЛ) \rightarrow 2CaOSiO_2(БЛ) \rightarrow 3CaO2SiO_2(Э_2) \rightarrow CaOSiO_2(ВЛ) \rightarrow 2CaO3SiO_2(Э_3) \rightarrow CaO2SiO_2(2К) \rightarrow CaO3SiO_2(M_2) \rightarrow CaO6SiO_2(М) \rightarrow CaO24SiO_2(M_1) \rightarrow SiO_2$.

Представлена классификация промежуточных фаз, существующих на полигональной диаграмме, включающая стехиометрический и химический состав, температуры образования и плавления, области гомогенности твердых и жидких растворов, а также структурное состояние жидких силикатов кальция в форме полигональных ячеек ионно-молекулярных комплексов, рассчитанных из орбитальных радиусов ионов кальция, кремния и кислорода.

Показано, что при температурах металлического расплава до 1700 °С в жидком состоянии находятся силикаты монотектические ($M_1 \rightarrow M \rightarrow M_2$), эвтектические ($Э_3$,$Э_2$) и $CaO2SiO_2 \rightarrow CaOSiO_2 \rightarrow 2CaOSiO_2$, жидкотекучесть которых регламентируется основностью шлака из отношения CaO/SiO_2 не более 2.

Список литературы

1. Смолеговский, А.М. Развитие представле-

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

ний о структуре силикатов. – М.: Наука, 1979. – 231 с.
2. Зайцев, А.И. Физическая химия металлургических шлаков / А.И. Зайцев, Б.М. Могутнов, Е.Х. Шахпазов. – М.: Наука, 2008. – 352 с.
3. Михайлов, Г.Г. Термодинамика металлургических процессов и систем / Г.Г. Михайлов, Б.И. Леонович, Ю.С. Кузнецов. – М.: МИСиС, 2009. – 520 с.
4. Improvement in efficiency, resource and ecological indices for extra-furnace steel treatment with fluxcored wire containing calcium reagents / V.V. Belousov [et al.] // Metallurgist. – 2013. – No.11-12. Vol. 56. – P. 58-62.
5. Наноструктурный анализ механизма образования неметаллических включений при ковшевой обработке стали сплавами ферросиликоалюминия / А.Я. Бабанин [и др.] // Электрометаллургия. – 2018. – №8. – С. 30-38.
6. Обработка железоуглеродистых расплавов высокоактивными реагентами / А.Я. Бабанин [и др.]. – Донецк: Восточный издательский дом, 2015. – 219 с.
7. Белов, Б.Ф. Структурно-химические основы процессов рафинирования железоуглеродистых расплавов / Б.Ф. Белов, А.И. Троцан, Я.П. Карликова. – Мариуполь: ПГТУ, 2018. – 184 с.
8. Irons, G.A. Settling and Clustering of Silicon Carbide Particles in Aluminum Metal Matrix Composites / G.A. Irons, K. Owusu-Boahen // Metallurgical & Materials Transactions B. – 1995. – Issue 5. Vol.26. – P. 981-989.
9. Bloom, F. Mathematical Modeling of the Flotation Deinking Process / F. Bloom, T.J. Heindel // Mathematical and Computer Modeling. – 1997. – Iss.5. Vol.25. – P. 13-58.
10. Пономаренко, А.Г. Вопросы термодинамики фаз переменного состава, имеющих коллективную электронную систему // ЖФХ. – 1974. – №7. Т.48. – С. 168-167.
11. Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов / Г.А. Григорян [и др.]. – М.: Металлургия, 1989. – 288 с.
12. О строении силикатных шлаковых расплавов / Б.Ф. Белов [и др.] // Процессы литья. – 2003. – №2. – С. 18-22.
13. Атлас шлаков: справочн. изд. / Пер. с нем. / Под ред. И.С. Куликова. – М.: Металлургия, 1985. – 208 с.
14. Бережной, А.С. Многокомпонентные системы окислов. – Киев: Наукова думка, 1970. – 542 с.

A.Ya. Babanin /Dr. Sci. (Eng.)/, B.F. Belov /Cand. Sci. (Eng.)/
Donbass National Academy of Construction and Architecture (Makeevka)
A.G. Ponomarenko /Dr. Sci. (Eng.)/, D.V. Pervukhin
Donetsk National Technical University (Donetsk)
I.A. Abakumov, A.Ya. Mints
Yuzovsky metallurgical plant (Donetsk)

CLASSIFICATION AND STRUCTURE OF CALCIUM SILICATES

Background. *The study of the structural and chemical state of the CaO-SiO_2 oxide system and the classification by chemical composition and structure by the architectural state of liquid and solid calcium silicates is an urgent task.*
Materials and/or methods. *The structural and chemical state of the oxide system was studied using polygonal diagrams of the state of oxide binary CaO-SiO_2 and metal calcium silicates systems built by the graph-analytical state-diagram construction method (SDC-method) in the entire range of solid and liquid initial components. The SDC-method corresponds to the Gibbs phase rule when the primary components are valence electrons of atoms (ions), which determine the type of chemical reactions as the chemical potentials of electrons in collectivised systems.*
Results*. As a result of the research, the classification by chemical composition and structure by a structural state of liquid and solid silicates of calcium presented in the form of SIM-complexes made. The given classification and structure of calcium silicates characterise the structural and chemical state of both equilibrium and intermediate phases of this system. Application of the research results allows optimising the composition of charge materials for obtaining a given structure of silicate-calcium alloys, as well as the technology of their use for refining and microalloying of steel in conditions of PJSC "Azovstal Iron & Steel Works" and Dneprovsky Metallurgical Complex.*
Conclusion. *Classification and structure of liquid and solid calcium silicates with the determination of*

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

both equilibrium and intermediate phases concerning the processes of production of silicate calcium alloys and their application for steel refining carried out.

Keywords: *calcium silicates, classification, structure, oxide system.*

Сведения об авторах

А.Я. Бабанин
Author ID: 25928278900
Телефон: +380 (71) 358-59-50
Эл. почта: Bay1957@mail.ua

А.Г. Пономаренко
SPIN-код: 6455-5863
Телефон: +380 (99) 764-27-66

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

Б.Ф. Белов
Телефон: +380 (71) 478-47-65
Эл. почта: belosvet100mail.ru

Д.В. Первухин
Телефон: +380 (50) 924-22-98
Эл. почта: pervuhin.mitya@yandex.ru

И.А. Абакумов
Телефон: +380 (71) 426-50-47
Эл. почта: vanekweird777@mail.ru

Статья поступила 05.12.2019 г.
© А.Я. Бабанин, Б.Ф. Белов, А.Г. Пономаренко, Д.В. Первухин, А.Я. Минц, И.А. Абакумов, 2020
Рецензент д.х.н., проф. Л.Ф. Бутузова





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

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, НАПРАВЛЯЕМЫМ В РЕДАКЦИЮ

1. Основной текст статьи должен содержать такие необходимые элементы, выделенные заголовками, как:

– **постановка проблемы** в обобщенном виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;

– **анализ последних исследований и публикаций**, в которых начато решение данной проблемы и на которые опираются авторы, выделение не решенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья;

– формулировка **цели (задач) исследования**;

– изложение **основного материала исследования** с полным обоснованием полученных научных результатов;

– **выводы** по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

2. Статья, основной текст вместе с рисунками и др. нетекстовыми элементами, должна быть объемом **8…10 полных** страниц формата А4 (210×297 мм) с полями **20** мм с каждой стороны. Рукопись статьи необходимо оформлять с помощью редактора MS Word. Шрифт – Times New Roman, **12** пт, стиль – обычный. Межстрочный интервал – одинарный. Расстановка переносов – автоматическая. Выравнивание – по ширине страницы. Страницы не нумеровать.

3. Структура статьи (каждый элемент с новой строки): код УДК; инициалы и фамилии авторов с указанием ученой степени каждого (количество авторов **не более 3-х** от одной организации); название организации, город, где работают авторы; название статьи; аннотация на русском языке (**не более 300** символов); ключевые слова (**от 3 до 5**); основной текст статьи; список литературы. Сокращение слов в тексте, рисунках и таблицах не допускается.

В аннотации на русском языке сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

В конце статьи, после списка литературы приводятся инициалы и фамилии, коды регистрации в наукометрических базах, телефоны и адреса электронной почты авторов, а также аннотация на английском языке.

Аннотация на английском языке должна представлять собой резюме, призванное выполнять функцию не зависимого от статьи источника информации. Резюме должно быть информативным (не содержать общих слов), оригинальным (не являться калькой аннотации на других языках), содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований), структурированным (следовать логике описания результатов в статье), компактным, но не коротким **(250-300** слов). Типичная структура резюме: состояние вопроса (**Background**); материалы и/или методы исследования (**Materials and/or methods**); результаты (**Results**); заключение (**Conclusion**); ключевые слова **(Keywords).**

Внимание! Убедительная просьба не разбивать текст на колонки, как это сделано в журнале, т.к. это усложняет редакторскую обработку статьи!

4. **Обязательным условием** является наличие в статье графического материала (рисунков, графиков, схем, фотографий), размером **не менее 80×80** мм, в формате *.tif или *.jpg, разрешением **не менее 300** dpi. Графический материал внедренными объектами размещается по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Все позиции, обозначенные на рисунках, должны быть объяснены в тексте. Под каждым рисунком указывается его порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце). Рисунки должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

Внимание! Запрещается внедрять графические материалы в виде объектов, связанных с др. программами, например, с КОМПАС, MS Excel и т.п. Рисунки, выполненные непосредственно в MS Word, не принимаются.

5. Математические формулы необходимо выполнять с помощью редактора формул **MS Equation Editor 3.0** в соответствии со следующими размерами: обычный символ – **11** пт; крупный индекс – **7** пт; мелкий индекс – **5** пт; крупный символ – **13** пт; мелкий символ – **8** пт.

Все величины, входящие в формулы, должны быть объяснены в тексте. Формулы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу. Формулы выполняются курсивом, **кроме цифр и символов и букв греческого алфавита**. Формулы нумеруются (справа в круглых скобках, не отступая от формулы) **только в том случае**, если в тексте на них имеются ссылки.

Внимание! Запрещается выполнять формулы с помощью MathCAD или др. аналогичных программ.

6. Таблицы должны иметь порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце) и располагаться по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Таблицы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

7. **Обязательным условием** является наличие в статье списка литературы, который приводится после выводов через один интервал (пустую строку) под заголовком **Список литературы**. Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу по тексту заключаются в квадратные скобки. В списке литературы должно быть **не менее 3-х** публикаций, вышедших **за последние 5** лет, а также **не менее 3-х** зарубежных (на иностранном языке) публикаций.

Для принятия решения о публикации статьи в журнале в адрес редакции необходимо выслать:

– сопроводительное письмо (с указанием, что статья ранее нигде не публиковалась) от организации, где работают авторы, и сведения об авторах статьи;

– экспертное заключение о возможности опубликования материалов в прессе и других средствах массовой информации, заверенное печатью и подписью руководителя организации, где работают авторы;

– электронный вариант статьи (имя файла составляется из фамилий авторов, например, ИвановПетров.doc) и сведений об авторах (имя файла – ИвановПетров_sved.doc). *В сведениях об авторах для каждого соавтора обязательно должен быть указан телефон, адрес персональной эл. почты, а также коды регистрации в наукометрических базах данных.*

Для ускорения подготовки очередных номеров журнала, просьба передавать сопроводительное письмо в отсканированном виде, электронный вариант статьи и сведения об авторах по эл. почте на адрес: **vestnikdonntu@gmail.com**

Внимание! Убедительная просьба, проверить получение редакцией материалов любым из способов (по телефонам **+380 (50) 103-35-08, +380 (62) 301-07-89** или эл. почте).

Редакция оставляет за собой право возвращать статьи авторам на доработку в следующих случаях: статья небрежно оформлена и не соответствует требованиям редакции журнала, приведенным выше; статья требует доработки в соответствии с замечаниями рецензента и редакторов; отсутствует сопроводительное письмо от организации, где работают авторы, или сведения об авторах.

Требования к рекламно-информационным материалам согласовываются непосредственно с редакцией журнала.

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

НАУЧНЫЕ ИЗДАНИЯ Донецкого национального технического университета



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

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

Периодичность – 4 раза в год

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

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



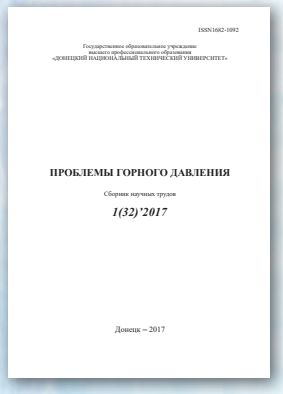
Научный журнал «Информатика и кибернетика»

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

Периодичность – 4 раза в год

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

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



Международный научный журнал «Проблемы горного давления»

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

Периодичность – 4 раза в год

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

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



Студенческий научно-технический журнал «Инженер»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000134 от 06.06.2017 г.

Периодичность – 2 раза в год

Научно-исследовательская часть

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

science.donntu.org

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

- *более 700 научно-педагогических работников;*
- *9 научных лабораторий, в т.ч. отдел интеллектуальной собственности и патентно-лицензионной работы;*
- *более 50 научных направлений и научных школ;*
- *ежегодно более 60 научно-исследовательских работ, в т.ч. 5 по договорам с промышленными предприятиями;*
- *4 диссертационных совета по 10 научным специальностям;*
- *14 направлений подготовки кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре;*
- *7 научных изданий, входящих в перечень ВАК ДНР и включенных в наукометрические базы данных (РИНЦ и др.);*
- *ежегодно более 2000 публикаций в научных изданиях республиканского и международного уровня;*
- *ежегодно порядка 120 научных и научно-технических мероприятий, в т.ч. более 20 мероприятий международного уровня;*
- *более 30 информационных ресурсов;*
- *базовая площадка Международного научного форума ДНР «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие»*



science.donntu.org/video
science.donntu.org/photo
science.donntu.org/rinc
science.donntu.org/book