ISSN 2518-1653 (online)
science.donntu.ru

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЕСТНИК

№1 (7) 2017 г.



К 65-летию со дня рождения
доктора технических наук, профессора

Кондрахина Виталия Петровича

НАУЧНЫЕ ИЗДАНИЯ Донецкого национального технического университета



Международный научно-технический журнал «Вестник ДонНТУ»

Свид-во о временной регистрации в Министерстве информации ДНР №303 от 06.08.2015

ISSN 2518-1645 (print), 2518-1653 (online)
Договор с РИНЦ от 14.06.2016 г. №425-07/2016

Периодичность – 6 раз в год

Научные направления:
02.00 – Химические науки;
05.04 – Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение;
05.05 – Транспортное, горное и строительное машиностроение;
05.09 – Электротехника;
05.14 – Энергетика;
05.17 – Химическая технология;
08.00 – Экономические науки;
Подробная информация - http://vestnik.donntu.ru

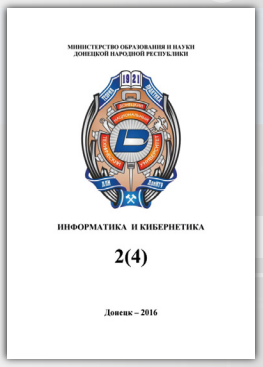
Научный журнал «Информатика и кибернетика»

Свид-во о временной регистрации в Министерстве информации ДНР №307 от 06.08.2015

Периодичность – 4 раза в год

Договор с РИНЦ от 14.06.2016 г. №425-07/2016

Научные направления:
01.01 – Математика;
05.01 – Инженерная геометрия и компьютерная графика;
05.12 – Радиотехника и связь;
05.13 – Информатика, вычислительная техника и управление;
Подробная информация - http://infcyb.donntu.ru





Международный научно-технический журнал «International journal of innovative and information manufacturing technologies»

Свид-во о временной регистрации в Министерстве информации ДНР №308 от 06.08.2015

ISSN 2311-6765
Договор с РИНЦ от 19.02.2016 г. №82-02/2016

Периодичность – 2 раза в год

Научные направления:
01.02 – Механика;
05.02 – Машиностроение и машиноведение;
05.11 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы;
Подробная информация - http://iimt.donntu.ru

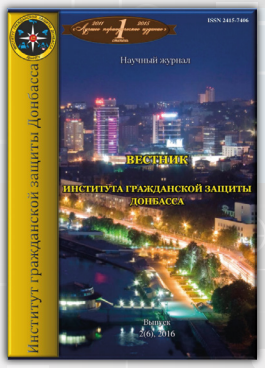
Научный журнал «Вестник Института гражданской защиты Донбасса»

Свид-во о регистрации в Министерстве информации ДНР от 08.11.2016 г. №02/1252 (print) и от 10.11.2016 г. №02/1268 (online)

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
05.12 – Радиотехника и связь;
05.13 – Информатика, вычислительная техника и управление;
05.23 – Строительство и архитектура;
05.26 – Безопасность деятельности человека;
13.00 – Педагогические науки;
Подробная информация - http://vestnik.igzd.donntu.ru

ISSN 2415-7392 (print), 2415-7406 (online)
Договор с РИНЦ от 14.06.2016 г. №425-07/2016
Включен в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР (приказ МОН ДНР №1134 от 01.11.2016 г.)



Вестник ДонНТУ №1(7)'2017

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

Адрес: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58
Телефоны: +380 (62) 304-60-82
Эл. почта: vestnikdonntu@gmail.com
Интернет: vestnik.donntu.org

Вестник ДонНТУ
2017. №1(7)

ISSN 2518-1653 (online)

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

Цена: бесплатно

Свидетельство о государственной регистрации №000133 от 27 мая 2017 г.

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 №5 от 02.06.2017

Формат 60×84$^{1/8}$. Изд-во «Донецкая политехника», 2016-2017

СОДЕРЖАНИЕ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

А.Е. Воробьев, Г.К. Ташкулова
Особенности и перспективы развития международного сотрудничества Кыргызско-российского славянского университета 3

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

А.П. Кононенко, Р.И. Божко
Обоснование энергетической целесообразности применения нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями 11

А.С. Красулин
Обоснование параметров упругого подвешивания катков маневрового тягача для обеспечения тягового усилия и устойчивости хода.....20

ЭНЕРГЕТИКА

А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв, И.П. Дробышевская
Анализ технологии производства биогаза из органических отходов для замены природного газа 25

А.Б. Бирюков, В. А. Семергей
Математическая модель выгорания пылеугольного топлива в топке энергетического котла 32

С.А. Лукьянченко
Проблемы управления в Smart Grid системах.....38

А.Н. Поперечный, Н.А. Миронова
Кинетика температурных полей плодовых косточек при инфракрасной сушке в виброкипящем слое 43

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

С.Л. Хилько, М.И. Рогатко
Потенциометрические исследования растворов солей гуминовых кислот.....49

С.Л. Хилько, М.И. Рогатко
Окислительно-восстановительное титрование солей гуминовых кислот.....55

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 печатном и эл. виде посредством сети Интернет; принимает участие в научных конференциях и выставках.

– Журнал включен в «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ). Интернет: elibrary.ru

– Редакция журнала принимает к публикации и осуществляет рецензирование рукописей статей по химическим, техническим и экономическим наукам и следующим группам специальностей: 05.02 – Машиностроение и машиноведение; 05.05 – Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.09 – Электротехника; 05.14 – Энергетика; 05.16 – Металлургия и материаловедение; 05.17 – Химическая технология.

VESTNIK DONNTU No.1(7)'2017

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.)*
Bershadskiy I.A. (Dr. Sci.(Eng.), Assoc. Prof.)*
Biryukov A.B. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*
Butuzova L.F. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*
Vyisotskiy 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.)*
Eronko S.P. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*
Zaharov N.I. (Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.*
Kovalyov 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.)*
Prisedskiy V.V. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Chentsov N.A. (Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.)*
Shabaev O.E. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*
Shapovalov V.V. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Yakovchekno A.V. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*
** - staff members of the founder*

Address: 283001, Donetsk, 58, Artema St.
Phone: +380 (62) 304-60-82,
E-mail: vestnikdonntu@gmail.com
Internet: vestnik.donntu.org

Vestnik DonNTU
2017. No.1(7)

ISSN 2518-1653 (online)

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

Price: Free

Certificate of State Registration
№000133 dated 27 May 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.5 dated 02.06.2017

Format 60×84$^{1/8}$. Publishing house "Donetsk Polytechnic", 2016-2017

CONTENTS

SCIENTIFIC NOTES

A.E. Vorobyov, G.K. Tashkulova
Features and prospects of development of international cooperation of Kyrgyz-Russian Slavic University 3

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION ENGINEERING

A.P. Kononenko, R.I. Bozhko
Substantiation of the energy feasibility of the use of pressure airlift installations with radial superchargers 11

A.S. Krasulin
Parameters substantiation for elastic suspension rollers of shunting tractor to provide traction and motion stability 20

POWER ENGINEERING

A.B. Biryukov, P.A. Gnitiev, I.P. Drobishevskaya
The analysis of technology for biogas production from organic waste to replace natural gas 25

A.B. Biryukov, V.A. Semergey
Mathematical model for pulverized coal burnout in the furnace of the power boiler 32

S.A. Lukyanchenko
Management problems in Smart Grid systems 38

A.N. Poperechnyi, N.A. Myronova
The kinetics of the temperature fields of fruit pits with infrared drying in vibrated fluidized bed 43

CHEMICAL TECHNOLOGY

S.L. Khil'ko, M.I. Rogatko
Potentiometric studies of solutions of humic acids salts 49

S.L. Khil'ko, M.I. Rogatko
Redox titration of salts of humic acids 55

INFORMATION

Requirements for the articles 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 editorial accepts for publication and reviews manuscripts on chemical, technical and economic sciences, and the following groups of specialties: 05.02 – Mechanical engineering and engineering science; 05.05 – Transport, Mining and Construction Engineering; 05.09 – Electrical Engineering; 05.14 – Energy; 05.16 – Metallurgy and materials science; 05.17 – Chemical Technology.

УДК 008.2

А.Е. Воробьев /д.т.н./
ФГАОУ ДПО «Институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов топливно-энергетического комплекса» (Москва)
Г.К. Ташкулова /д.э.н./
Академия государственного управления при президенте Кыргызской Республики (Бишкек)

ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКОГО СЛАВЯНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Рассмотрены основные задачи открытия Россией в странах СНГ славянских университетов и дан анализ международной деятельности Кыргызско-Российского Славянского университета в контенте деятельности сопоставимых по масштабу российских региональных университетов. Проанализированы основные показатели Кыргызско-российского славянского университета. Показано, что перспективы дальнейшего международного научного сотрудничества КРСУ определяются рядом важных особенностей и обстоятельств Кыргызстана: его геополитической характеристикой, историческими связями, а также современными тенденциями межстранового общения и взаимодействия, ресурсными возможностями, туристическим потенциалом, культурным наследием и перспективами национального развития. Важным представляются приграничные страны – Казахстан, Таджикистан, Узбекистан и Китай. Установлено, что необходимы пересмотр и довольно серьезное укрупнение научных направлений исследований по типу технологических платформ, куда составными частями войдут отдельные узкие темы НИР. Целесообразно также изменить сложившиеся подходы к научным исследованиям, в настоящее время определяемым использованием морально устаревшей материально-исследовательской базы, которая обуславливает неизбежность появления существенно отстающих от мирового мейнстрима по своей значимости и отдаче получаемых результатов.

Ключевые слова: *международное научное сотрудничество, Кыргызско-Российский Славянский университет, перспективы развития.*

Российские (славянские) университеты, действующие в Кыргызстане (Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Н. Ельцина был открыт в 1993 г.), Таджикистане (Таджикско-Российский Славянский университет был образован в 1996 г.), Армении (Российско-Армянский Славянский университет был создан в 1997 г.) и Белоруссии (Белорусско-Российский университет был преобразован в 2001 г. из Могилевского машиностроительного университета), открывались как весьма важные центры российского образования, науки и культуры в странах, входящих в систему СНГ, и соответственно, ежегодно финансировались Министерством образования и науки РФ также, как и обычные российские университеты.

Дополнительно, в 2014 г. Министерство образования и науки РФ инициировало принципиально новый проект по разработке и реализации программ дальнейшего развития российских (славянских) университетов, который был направлен на решение таких стратегических задач, как [1]:

– стимулирование и поддержка позитивных изменений в славянских университетах в целях их более активного и успешного позиционирования на национальных и мировых рынках образовательных услуг, трансфера результатов НИОКР и инновационной деятельности в реальный сектор экономики;

– активное включение этих университетов во взаимовыгодное партнерство с ведущими российскими и мировыми научно-образовательными центрами;

– содействие формированию в них должных объективных условий и необходимых компетенций, служащих дальнейшему устойчивому развитию славянских университетов.

Однако, кроме государственного (бюджетного) финансирования, славянским университетам необходимо обеспечить самостоятельный поиск альтернативных источников дополнительного внебюджетного финансирования (в т.ч. за счет зарубежных грантодержателей и различных международных фондов).

Необходимо отметить, что международное научное сотрудничество оказывает значительное влияние на многие экономические показатели

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

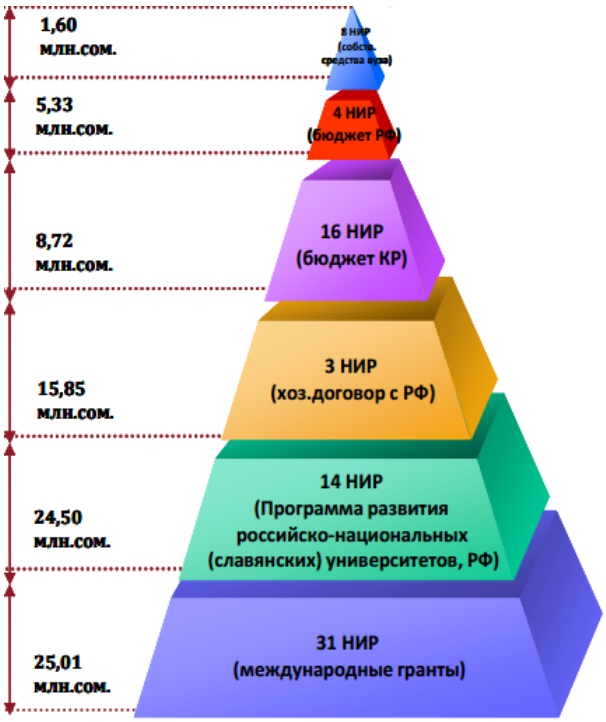


Рис. 1. Показатели КРСУ
по зарубежным грантам [4]

местных университетов и их материально-техническое оснащение, а также обуславливает существенное повышение качества научных исследований и совершенствование учебного процесса в целом. Так, в рамках международных научных проектов появляется возможность получить или приобрести новейшее исследовательское оборудование и программное обеспечение, позволяющее повышать эффективность как научных исследований, так и непосредственно учебного процесса. Например, в 2004 г. при выполнении 60-ти международных научных проектов ТГУ (Россия) поступило исследовательского оборудования на сумму свыше 464 тыс. руб. [2].

Кроме того, международные программы по созданию новых направлений обучения студентов изначально выстраиваются таким образом, что учебные курсы разрабатываются с учетом новейших методик обучения. Курсы, построенные по такой технологии, позволяют обеспечить активное участие студентов всех уровней обучения (бакалавров, специалистов, магистрантов и аспирантов) в учебном процессе, что значительно повышает их интерес к получению новых знаний, а следовательно, и общую эффективность обучения.

В настоящее время многие вузы стараются более четко определить или даже пересмотреть свою миссию, а, следовательно, и место в общественном развитии, что позволит им существенно повысить эффективность своей работы [3]. Не избежал этого процесса и такой вуз, как Кыргызско-Российский Славянский университет (КРСУ), в 2015 г. выполняющий 31 международную НИР (рис. 1).

Для сравнения и последующего анализа целесообразно исследовать подобные показатели аналогичных региональных российских вузов [5]: так, например, в АлтГУ наблюдается постоянное увеличение количества зарубежных грантов (рис. 2), обеспечивающих явно выраженный рост общих финансовых показателей этого университета (рис. 3).

Необходимо также отметить, что возможности и перспективы дальнейшего международного научного сотрудничества КРСУ определяются рядом важных особенностей и обстоятельств Кыргызстана, обусловленных следующими основными факторами.

Геополитической характеристикой Кыргызстана

Геополитика, объясняющая структуру мира, опирающуюся на слагаемые закономерности распределения и перераспределения благ, есть не что иное, как выражение постоянной борьбы различных государств за контроль над разнообразными ресурсами (территориями, людьми, сырьем, водой и т.д.) и за пути их транспортировки. Историческим ядром геополитики выступает география, ставящая во главу угла исследование прямых и обратных связей между имеющимися свойствами территорий и балансом

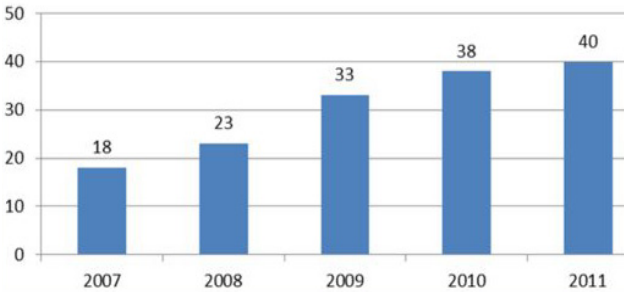


Рис. 2. Количество договоров АлтГУ
с зарубежными вузами

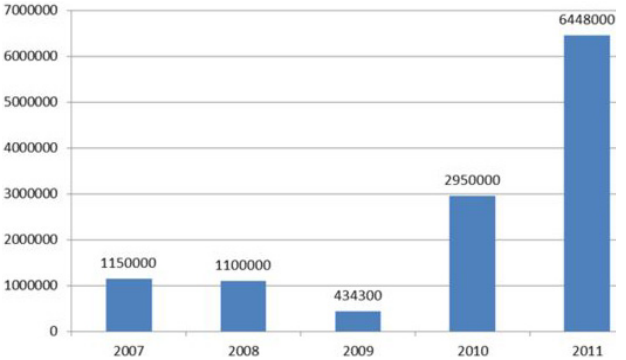


Рис. 3. Зарубежное финансирование НИР
в АлтГУ (тыс. руб.)

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

(соперничеством или сотрудничеством) стран мира [6].

Так, в силу своего географического местоположения и исторических особенностей предыдущего развития Центральная Азия была и остается своеобразной геополитической площадкой, где сосуществуют сообщества разных национальностей, культур и конфессий. Поэтому и дальнейшее развитие национальной системы образования в Кыргызстане необходимо рассматривать сразу по нескольким направлениям: национальному, региональному и международному.

Современное геополитическое положение Кыргызстана на региональной карте мира определяют следующие факторы (рис. 4) [7]:

– на севере – политически дружественные Казахстан и Россия, связанные с Кыргызской Республикой посредством Туркестано-Сибирской железной дороги;

– на юге – довольно нестабильные Таджикистан, Афганистан, Кашмир и Синьцзянь (Кашгария);

– на западе – несколько перенаселенный и нестабильный Узбекистан;

– на востоке – Китай (со значительным военным и демографическим потенциалом), имеющий с Кыргызстаном 858 км общей границы.

Геополитическое положение Кыргызстана позволяет ему быть весьма выгодным мостом для транзитных перевозок товаров и пассажиров между Европой и Азией.

Историческими связями, а также современными тенденциями межстранового общения и взаимодействия

Турция одной из первых признала независимость новых государств Центральной Азии, с которыми начала устанавливать двусторонние отношения еще до окончательного распада СССР, а после его распада Анкара стремится заполнить образовавшийся идеологический вакуум пантюркизмом [9], предполагающим патронат Турции над всеми тюркскими народами (в т.ч. и кыргызским).

В отличие от других стран Китайская Народная Республика имеет в Кыргызстане более явные цели, связанные, прежде всего, с сырьевым обеспечением промышленности КНР, дальнейшим развитием рынка китайских товаров и их транспортировкой [10]. В частности, большая часть китайских проектов (как и раньше, когда широко функционировал Шелковый путь) так или иначе связана с транспортной инфраструктурой (в т.ч. строительством автомобильных и железных дорог, линий электропередач и магистральных трубопроводов), а также логистикой, развитой на территории Кыргызской Республики пока еще на минимальном уровне.

Кроме этого, Китай считает, что вложение значимых инвестиций в еще довольно ненадежный рынок Кыргызстана требует создания здесь определенной системы гарантий, одной из которых является подготовка местных специалистов, заинтересованных в работе с китайской стороной, в т.ч. и в изучении китайского языка [10].

Продвижение китайских проектов в Кыргызстане с целью формирования положительного образа этой страны в глазах кыргызстанцев предполагается обеспечивать за счет создания сети учебных центров (в т.ч. и благодаря распространению опыта работы филиалов Институтов Конфуция, действующих по всему миру). Так, согласно китайской Канцелярии государственной руководящей группы по распространению китайского языка за рубежом, «на 2013 г. в Казахстане, Кыргызстане, Таджикистане и Узбекистане действуют десять Институтов Конфуция и открыты двенадцать Классов Конфуция. В них обучаются около 23 тыс. студентов» [9].

Однако Китай по важности прогнозируемых последствий не может сравниться с Россией: так, с виду довольно мягкая, но исключительно прагматичная политика Китая в долгосрочной перспективе может полностью поставить национальную экономику Кыргызстана в прямую зависимость.

Европейский Союз, в рамках реализации стратегической программы для совершенствования системы образования в Кыргызстане, уже декларировал введение в действие «Европейской инициативы в области образования», направленной на содействие национальным образовательным моделям в вопросах их приближения к международному уровню качества образования. Объектами поддержки «Европейской инициативы» стали ключевые ступени национального образования Кыргызстана [10]: начальное, сред-

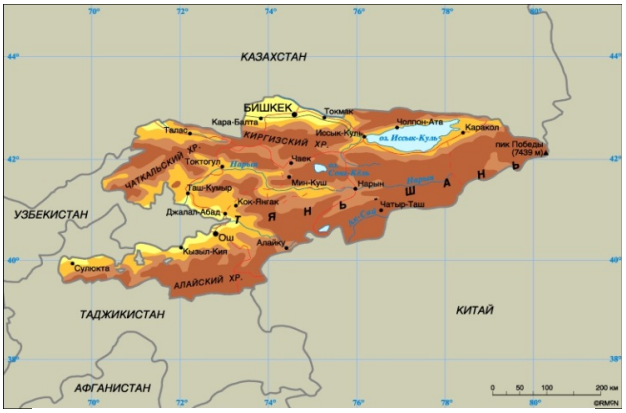


Рис. 4. Кыргызстан в Центрально-Азиатском регионе [8]

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

нее и профессионально-техническое образование.

Кроме этого, определенную актуализацию получила инициатива Европы, связанная с реализацией Программы «Реформа систем образования в Центральной Азии» [11]. Заказчиком этой программы выступило Федеральное министерство экономического сотрудничества и развития Германии. В отличие от «Темпус» и «ЭразмусМундус» данная программа нацелена только на школьное и дошкольное образование и реализует модернизацию в контексте общерегиональной универсализации [10].

Показательно, что данная программа является достаточно фундаментальной, о чем свидетельствует длительный срок ее реализации – с 2009 по 2016 г., а также ее довольно внушительный бюджет, составляющий 6,5 млн. евро.

Кроме того, эта программа имеет отчетливо видимые практические результаты, среди которых – осуществление переподготовки 1500 педагогов, создание лабораторий и специальных кабинетов в 7-ми центральных школах Кыргызстана и др. [10].

Характерно, что немецкий проект не является закрытым и имеет практический выход, а также определенное влияние на ситуацию в Кыргызстане [10]. Примером служит портал www.mugalim.kg, на котором реализуется киргизский инициативный проект «Күчбирдикте». Целью этого проекта является создание единой информационно-справочной сети педагогических вузов Кыргызской Республики, а также целевое ориентирование выпускников средних школ на получение педагогических специальностей и привлечение внимания общественности республики и правительства Кыргызстана к проблемам нехватки школьных учителей и невысоких требований к качеству среднего профессионального педагогического образования в республике.

Однако наиболее близкой к Кыргызстану страной (в т.ч. в этнокультурном отношении) является Россия. Так, Российская Федерация и Кыргызстан в социокультурном плане до сих пор во многом представляют собой фактически единое пространство, и, несмотря на существование политических границ каждого из этих государств, общность культурных, духовных и цивилизационных оснований их развития сохраняется до сих пор [10]. В практическом плане это отражается в том, что около 27 % кыргызстанцев имеют российские паспорта, с выраженной тенденцией к росту этого показателя [12].

Кроме того, именно Россия остается для Кыргызстана основным гарантом региональной социально-политической стабильности. Так, открытая и самая протяженная в мире сухопутная российско-казахстанская граница (7512,8 км) ставит Россию перед необходимостью взять на себя все существующие издержки по обеспечению безопасности в целом в Центральной Азии [10]. Последнее обретает особую актуальность в свете резкого повышения современных угроз со стороны международного терроризма и религиозного экстремизма (как это наблюдается в последние годы в Сирии).

Ввиду значительного оттока русскоязычного населения из Кыргызстана, а также усиления исламского фактора (со стороны соседних стран – Турции, Ирана, Пакистана и др.) одним из наиболее важных вопросов взаимодействия с Россией стало сохранение статуса русского языка в республике и, соответственно, определенных элементов русскоязычного образования [10].

Существенные и стабильные потоки трудовых мигрантов в Россию также стимулируют интерес кыргызстанцев к русскому языку, что создает определенные условия к сохранению и формированию русского образовательного сегмента в Кыргызстане. Так, во многих городах Кыргызстана до настоящего времени широко распространен русский язык, и его популярность растет среди школьников и их родителей [13].

В 2015 г. в Бишкеке прошла II выставка-ярмарка образовательных организаций Российской Федерации при поддержке Посольства РФ, Представительства Россотрудничества в Кыргызской Республике и Министерства образования и науки Кыргызстана. В этом мероприятии приняли участие 15 высших образовательных учебных заведений России – Всероссийская академия внешней торговли МЭР РФ, Российский экономический университет им. Плеханова, МФТИ, Дальневосточный федеральный университет, Курский государственный университет, Уфимский государственный университет экономики и сервиса и др.

Ресурсными возможностями

Кыргызстан обладает довольно существенными геогенными и техногенными запасами различных полезных ископаемых (табл. 1).

Кроме этого, к настоящему времени на территории Кыргызской Республики уже детально разведано и оценено около 70-ти месторождений угля и различных углепроявлений [14]. В результате, суммарные разведанные запасы угля в республике оцениваются величиной около 1,9 млрд. т, что в денежном исчислении составляет свыше 10000 млрд. сом.

В результате освоения лишь некоторой части

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

Табл. 1. Показатели геогенных месторождений полезных ископаемых Кыргызстана

№	Виды полезных ископаемых	Балансовые запасы
1	Золото	430 т
2	Нефть	101,5 млн. т
3	Природный газ	6,3 млрд. $м^3$
4	Алюминий	349 млн. т
5	Олово	208,3 тыс. т
6	Сурьма	157,5 тыс. т
7	Вольфрам	144,2 тыс. т
8	Бериллий	74,8 тыс. т
9	Редкоземельные металлы	51,5 тыс. т
10	Ртуть	40 тыс. т
11	Молибден	2358,0 т

геогенных месторождений полезных ископаемых (а в республике накоплен определенный потенциал и техногенных минеральных объектов – различных отвалов и хвостохранилищ) налоговые поступления от горнодобывающей промышленности Кыргызстана, например, в 2012 г. составляли 8,5 млрд. сом. В национальной Стратегии развития Кыргызстана на 2017 г. была намечена реализация дополнительно 16-ти проектов по разработке геогенных месторождений полезных ископаемых, с общей стоимостью свыше 3 млрд. долларов США.

Помимо этого Кыргызская Республика обладает значительными запасами гидроэнергетических ресурсов. Так, имеющийся здесь гидроэнергетический потенциал 252-х крупных и средних (обычно горных) рек оценивается в 18,5 млн. кВт мощности, или более 140 млрд. кВтч электроэнергии.

В частности, гидрологические ресурсы бассейна Аральского моря (территории Узбекистана и Казахстана) на 75 % формируются в горах Южного Кыргызстана (прежде всего р. Нарын, имеющей длину 535 км, со средним объемом воды при втекании в Узбекистан – 429 м3/с), бассейна Тарима (территория Китая) – на 12,4 % (р. Джергалан при втекании в Китай со стороны Кыргызстана имеет объем 140 м3/с), а оз. Балхаш (территория Казахстана) – на 0,3 %, и т.д.

Следует отметить, что существующий недостаток воды и электроэнергии в южных регионах Казахстана, на востоке Узбекистана и на северо-западе Китая в дальнейшем будет способствовать налаживанию устойчивых связей с Кыргызстаном, обладающим значительными и самовоспроизводящимися водными ресурсами.

При этом для сопредельных с Кыргызстаном других регионов и государств представляется ценной не только сама вода как жизненно важный, исключительно необходимый фактор, но также и обусловленный ею фактор повышения плодородия сельскохозяйственных почв за счет аллювиальной и пролювиальной седиментации горных массивов Кыргызстана, их субаэральной денудации и гравитационного перемещения образующихся измельченных минеральных продуктов и растворенных питательных веществ в составе речных потоков в ниже расположенные долины и области – Узбекистан, Казахстан и Китай.

Кроме этого, территория Кыргызстана (за счет наличия в его пределах высокогорья, ледников, озер и рек, а также произрастающей здесь растительности) является важным регулятором регионального климата территории ЦАР.

Туристическим потенциалом Кыргызстана

Под туристическим потенциалом территории или страны в целом обычно понимают всю совокупность имеющихся природных (в литосфере, гидросфере, атмосфере и биосфере) и искусственных (культурно-политических, историко-архитектурных, религиозных и этнографических, а также санаторно-курортных) объектов, пригодных для удовлетворения различных (культурных, эстетических, познавательных, оздоровительных и др.) потребностей всех заинтересованных лиц.

Так, в Кыргызстане, который в среднем посещают 3 млн. туристов в год, только туристический потенциал оз. Иссык-Куль оценивается в 1 млрд. долларов США. В частности, около 2 млн. человек ежегодно выбирают местом своего отдыха или лечения побережье оз. Иссык-Куль. Например, в 2008 г., по статистическим данным, лишь из г. Алма-Ата на Иссык-Куль приехало отдыхать около 850 тыс. человек.

Однако в сравнении с другими санаторно-курортными объектами эти показатели не являются запредельными. Например, количество туристов, отдыхающих или проходящих курс лечения и реабилитации на Мертвом море (Израиль), составляет свыше 60 тыс. человек в день.

Данное обстоятельство объясняется тем, что даже при высокой привлекательности различных туристических ресурсов (что весьма характерно для Кыргызстана), без наличия должной инфраструктуры, сопровождающих эти зачастую уникальные объекты природы, культуры, искусства и т.д., масштабный туристический бизнес практически невозможен [15].

В частности, в Швейцарии имеется объект туризма – водопад Трюммельбах [16], где был создан уникальный природно-архитектурный комплекс, где скоростные лифты поднимают туристов на любой из шести этажей водопада,

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

соединенных галереями-штольнями (построенными еще в 1913 г.), площадками и тропами, проложенными вдоль всего водяного потока. В результате сочетания комплекса природных особенностей и инфраструктурных удобств и архитектурных решений этот водопад посещает довольно значительное количество туристов из разных стран мира.

В Кыргызстане есть похожий туристический объект – не менее уникальный водопад Абшир-Ата, где поток воды вырывается из четырехугольной пещеры (размером 1,2×1,2 м) скалы на высоте 12 м. Однако его посещает гораздо меньше туристов.

Для сравнения, посещаемость водопадов Дамахагуа (Доминикана) составляет 70 тыс. чел. в год, а водопад Дэтянь в Китае за год посетили 310 тыс. китайских и зарубежных туристов.

Культурным наследием и перспективами национального развития

В эпоху неолита (4-3 тысячелетия до н.э.) был осуществлен переход от присваивающих форм ведения хозяйства к производящим, обусловившим разделение труда с выделением земледелия, скотоводства, ремесел, строительства, а также появление вождей, жрецов и воинов.

Самыми первыми известными очагами цивилизации были города-государства Месопотамии, появившиеся в долине рек Тигр и Евфрат примерно 5 тыс. лет назад. Они получили название «речных», т.к. во многом их возникновение было обусловлено необходимостью создания многочисленных оросительных систем на возделываемых землях [14].

Необходимо отметить, что в развитии мировой цивилизации кочевники сыграли огромную, а порой и определяющую роль. Так, номады одомашнили лошадь, верблюда, коров, баранов и т.д., а кроме этого создали такие системы коммуникации, которые по скорости и расстоянию передачи культурной информации были недосягаемы для оседло-земледельческих культур.

Если оценивать вклад в мировую цивилизацию кочевых народов, то нужно отметить кыргызов, со сверхинформационным (7 томов, 180378 строк) эпосом «Манас», который на протяжении многих веков являлся глубинным выражением национального самосознания, высшим мерилом духовности этого народа, охватывая все имевшиеся аспекты жизни кочевников Центральной Азии. В частности, в этом эпосе было отражено историческое прошлое кыргызского народа, его многовековая история, национальная культура, обычаи и традиции, менталитет, этические установки и философия (основанная на тенгрианстве).

Известные на сегодняшний день материальные объекты культурного наследия Кыргызстана обычно располагаются по территориям предгорий, речных долин и межгорных впадин (рис. 5).

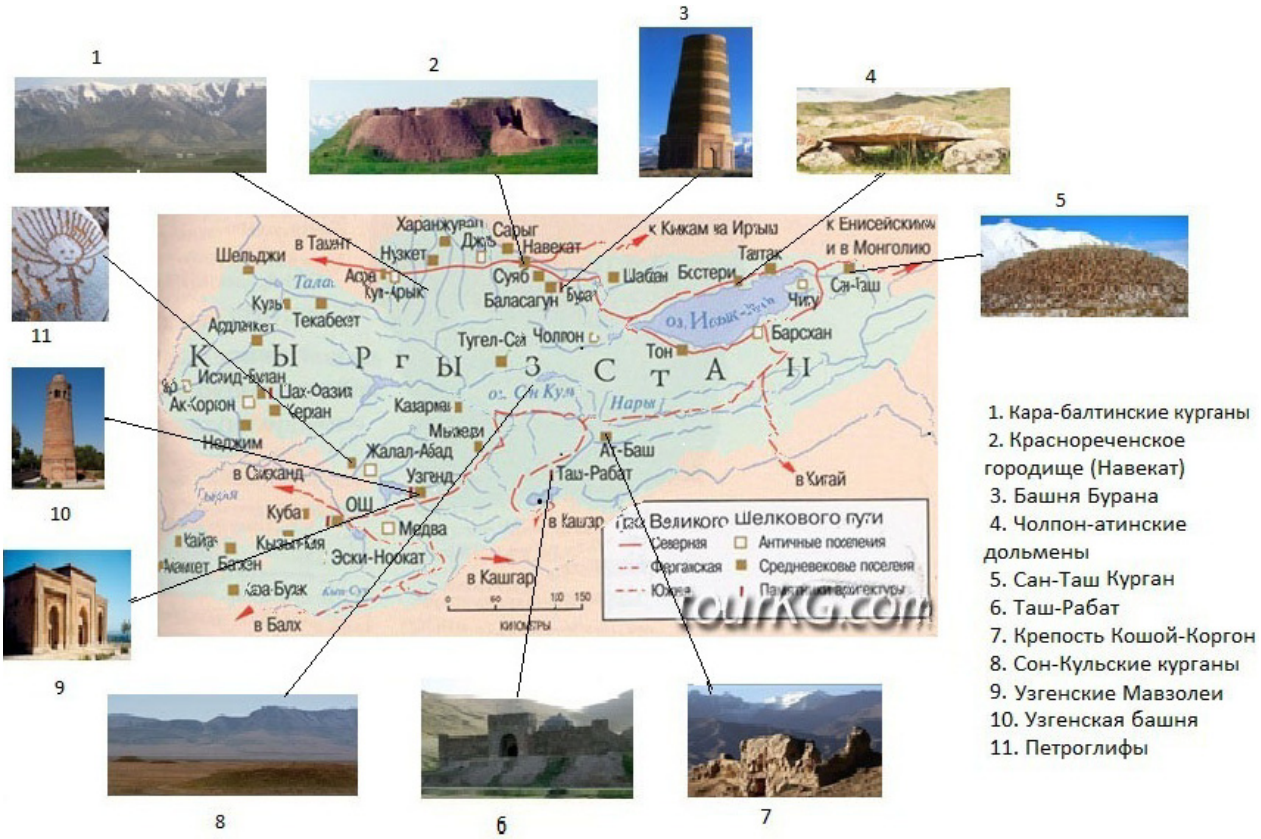


Рис. 5. Объекты культурного наследия (Кыргызстан)

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

Выводы

Представленный анализ показывает сложившуюся в Кыргызстане обобщенную геополитическую ситуацию, в которой осуществляют свои образовательные программы национальные, зарубежные и совместные (КРСУ и др.) вузы, действующие в республике.

Необходимо отметить, что если предки современных кыргызстанцев оставили столь значимое в этнокультурном отношении наследие, к тому же признанное во всем мире, то и настоящее научное сообщество Кыргызстана должно оставить в наследие своим потомкам что-то довольно весьма важное и значимое.

Поэтому дальнейшие перспективы развития международного научного сотрудничества должны не только учитывать рассмотренные особенности Кыргызстана, но и кардинальным образом изменить сложившиеся (традиционные) подходы к проведению научных исследований.

Во-первых, необходим пересмотр и довольно серьезное укрупнение научных направлений исследований, по типу технологических платформ, куда составными частями войдут отдельные узкие темы НИР.

Реализация подобных научно-технологических платформ позволит сконцентрировать финансовые и организационные усилия на актуальных исследованиях, обеспечивающих максимальный эффект отдачи как в среднесрочной, так и долгосрочной перспективе [17-19].

При этом сведение отдельных НИР КРСУ в формат технологических платформ будет способствовать:

– определению возможных основных центров мирового лидерства и точек дальнейшего роста;

– выявлению ведущих научных коллективов мирового уровня;

– эффективной кооперации университета с передовыми профильными компаниями;

– расширению международной интеграции;

– увеличению академической мобильности студентов и преподавателей;

– созданию и внедрению действенных механизмов мотивации ученых;

– популяризации исследовательской и инновационной деятельности.

Во-вторых, целесообразно изменить сложившиеся подходы к научным исследованиям, в настоящее время определяемым использованием морально устаревшей материально-исследовательской базы, которая обуславливает неизбежность появления существенно отстающих от мирового мейнстрима по своей значимости и отдаче получаемых результатов.

Среди современных инструментов, позволяющих сгенерировать кардинально новые инновационные знания и продукты, необходимо выделить методы и базовые подходы таких теорий, как нанотехнологии, биоинформатика, молекулярная генетика, биоинженерия, клеточные и тканевые технологии, протеомика, молекулярная физиология и др. [20], являющихся опережающими и прорывными.

Помимо масштабных исследований целесообразно существенно увеличить количество и разнообразие мелких и средних проектов, подаваемых в узкоспециализированные фонды и программы, такие как [2]:

– Дарвиновская инициатива и Малые экологические проекты SEPS (Великобритания);

– Программа «Распространение опыта и результатов» (РОЛЛ) (США);

– Нидерландский фонд поддержки научных исследований;

– Шведская королевская академия наук и др.

Однако необходимо отметить, что подобные исследования обычно имеют несколько ограниченное финансирование: в среднем 20-200 тыс. долларов США в год, но зато и их заявки рассматриваются в соответствующих фондах значительно быстрее и с меньшим количеством бюрократических препон, т.е. подобные заявки имеют гораздо больше шансов на успешное прохождение.

Кроме того, необходимо добиться проведения на базе КРСУ конференций одной из самых престижных американских программ академических обменов Фулбрайта и не менее значимой программы – германской DAAD. Целью их проведения может быть анализ информации о научных исследованиях, проводимых в рамках этих программ, обмен опытом эффективной работы, обсуждение актуальных проблем развития сферы исследования в университетах Кыргызстана и ЦАР, а также возможностей использования американского и немецкого опыта при проведении научных исследований.

В оперативном плане управления, для дальнейшего наращивания объемов финансирования научной международной деятельности, которая составляет около 20 % годового бюджета всех научных проектов КРСУ (см. рис. 1), необходимо обеспечить массовое вовлечение всех ППС и сотрудников подразделений в этот процесс. Пока же международной научной деятельностью занимаются не более 10 % подразделений и кафедр КРСУ и менее 1 % его сотрудников.

Список литературы

1. Старчак, М.В. Российское образование на

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

русском языке как фактор влияния России в Центральной Азии: что происходит и что делать: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.russkiymir.ru/publications/190915
2. Показатели НИД и НИДС за 2015 г.: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.krsu.edu.kg/images/informacia/nauchno-innovacionnaya-deyatelnost/UION/05-Nauchno-innovacionnaya-deyatelnost/pokazateli-NID2015.pdf
3. Адамкулова, Ч.У. Проблемы и перспективы интернационализации высшего образования в Кыргызстане // Инновационная наука. – 2015. – №12-1. – С. 23-30.
4. Плотников, Д.С. «Мягкая сила» политики Китая, Турции, Ирана, России и США в Центральной Азии в сфере образования // Ars Administrandi. – 2016. – №1. – С. 160-174.
5. Воробьев, А.Е. Современные парадигмы и концепции развития регионов / А.Е. Воробьев, Л. Ибройева // Горное, нефтяное, геологическое и геоэкологическое образование в XXI веке: материалы VII Межд. конф., 13-18 мая 2013, Москва-Кызылкия. – М.: РУДН, 2013. – С. 146-148.
6. Геополитика Киргизии: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=500245
7. Кыргызстанцы предпочитают российские паспорта: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rus.ozodi.org/a/ 24316471.html
8. Киргизия: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.klevoz.ru/nuda/kirgiziya-oficialenoe-nazvanie-kirgizskaya-respublika-kirg-kir/stranica-2.html
9. Славянские университеты: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://5-100.spbstu.ru/slavyanskie-universitetyi
10. Международное сотрудничество университета: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://lib.exdat.com/docs/1059/index-25463.html
11. Акматбаев, У.Т. Сотрудничество Кыргызстана и Федеративной Республики Германии в сфере образования // Наука, новые технологии и инновации. – 2010. – №9. – С. 90-96.
12. Медушевский, Н.А. Образовательные системы стран Центральной Азии: вызовы, риски и перспективы регионального сотрудничества / Н.А. Медушевский, А.Р. Шишкина // В сб.: Системный мониторинг глобальных и региональных рисков. – Волгоград, 2014. – С. 324-363.
13. Туристические ресурсы Кыргызстана: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.open.kg/tourist/19-turisticheskie-resursy-kyrgyzstana.html
14. Цивилизация что такое? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://fb.ru/article/222455/tsivilizatsiya-chto-takoe-osobennosti-chertyi-razvitie-tsivilizatsii-istoriya-tsivilizatsiy-russkoy-zapadnoy-vostochnoy-sovremennoy-mirovyie-tsivilizatsii#image1062863
15. Хабиров, В.В. Теоретические основы развития горнодобывающих и перерабатывающих производств Кыргызстана / В.В. Хабиров, А.Е. Воробьев. Под ред. акад. Н.П. Лаверова. – М.: Недра, 1993. – 316 с.
16. Водопад Трюммельбах: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://turistto.ru/vodopad-tryummelbax
17. Воробьев, А.Е. Методология проектирования инновационных научных исследований и формирования технологических платформ / А.Е. Воробьев, А.А. Верчеба, А.С. Каукенова. – М.: МГРИ-РГГРУ, 2013. – 119 с.
18. Воробьев, А.Е. Научная составляющая индустриально-инновационного развития государства / А.Е. Воробьев, О.Ш. Тулегенова, А.С. Каукенова. – Атырау (Казахстан): АИНГ, 2013. – 210 с.
19. Воробьев, А.Е. Пути научно-инновационного развития в XXI веке / А.Е. Воробьев, О.Ш. Шамшиев, А.О. Маралбаев, А.С. Каукенова. – Бишкек: ИЦ «Текник», 2014. – 329 с.
20. Аничкин, Е.С. Усиление роли университетов в развитии трансграничных регионов: вызовы и решения // Экономика. Профессия. Бизнес. – 2015. – №2. – С. 47-52.

Сведения об авторах

А.Е. Воробьев
Телефон: +7 (906) 777-49-55
Эл. почта: fogel_al@mail.ru

Г.К. Ташкулова
Телефон: +996 (777) 59-30-10
Эл. почта: gulzat0407@mail.ru

Статья поступила 04.04.2017 г.
© А.Е. Воробьев, Г.К. Ташкулова, 2017

УДК 621.695

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

ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК С РАДИАЛЬНЫМИ НАГНЕТАТЕЛЯМИ

Проанализированы возможные практические проблемы, связанные с работой эрлифтных установок традиционной технологической схемы, и доказана целесообразность применения нагнетательных эрлифтных установок. Выполнена оценка работы нагнетательной эрлифтной установки на примере использования в ее составе радиального нагнетателя ЦНВ 200/3,0. Доказано, что в сравнении с эрлифтной установкой традиционной технологической схемы работа эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в нагнетательном режиме, в диапазоне относительных погружений α=0,15-0,5, обеспечивает увеличение высоты подъема жидкости (гидросмеси) при увеличении КПД эрлифта и эрлифтной установки.

Ключевые слова: *нагнетательный эрлифт, радиальный нагнетатель, высота переподъема, энергоэффективность.*

Постановка проблемы

В эрлифтных установках традиционной технологической схемы движение жидкости (гидросмеси) после воздухоотделителя осуществляется безнапорно (с возможными участками потока, имеющими свободную поверхность), что требует обеспечения уклона отводящего трубопровода в сторону конечного потребителя этой жидкости (гидросмеси), то есть определенной высоты переподъема эрлифтом относительно данного потребителя. В некоторых случаях возникают ограничения по возможной высоте подъема эрлифта традиционной схемы из-за стесненных вертикальных габаритов в месте расположения установки (например, ограничения вертикальными габаритами горных выработок, загроможденностью пространства строительными конструкциями, технологическим оборудованием и т.д.), что исключает применение таких установок как средств гидроподъема.

Обеспечить движение жидкости (гидросмеси) по отводящему трубопроводу с восходящим уклоном возможно только при абсолютном давлении в воздухоотделителе, превышающем абсолютное давление у потребителя перекачиваемой жидкости (гидросмеси). При равенстве давления у потребителя давлению окружающей среды (как правило, атмосферному давлению) в воздухоотделителе необходимо иметь избыточное давление, обеспечивающее компенсацию гидравлических потерь в отводящем трубопроводе и, в случае необходимости, подъем жидкости (гидросмеси) на высоту, равную разности геодезических отметок центров тяжести сечений в начале и окончании отводящего трубопровода [возможным изменением скоростного напора перекачиваемой жидкости (гидросмеси) по длине отводящего трубопровода пренебрегаем].

Работа эрлифта традиционной технологической схемы с избыточным давлением в воздухоотделителе повлечет снижение его энергетической эффективности, так как это эквивалентно увеличению высоты подъема при прочих равных условиях.

Минимизировать потери энергетической эффективности работы эрлифтной установки с радиальным (центробежным) нагнетателем в качестве источника пневматической энергии возможно при подаче во всасывающий патрубок последнего частично сжатого воздуха с избыточным давлением, имеющим место в воздухоотделителе. При сохранении потребного давления сжатого воздуха в нагнетательном патрубке радиальной машины, преимущественно определяемого геометрическим погружением смесителя эрлифта, это уменьшит энергопотребление на производство одного и того же количества единицы пневмоэнергии из-за снижения требуемой степени сжатия воздуха в нагнетателе. Реализация описанного возможна при работе газожидкостного подъемника по принципу нагнетательной эрлифтной установки.

Такая организация работы эрлифтных установок позволит расширить область их применения. Поэтому обоснование энергетической целесообразности применения нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями является актуальной научной задачей, имеющей существенное практическое приложение.

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

Анализ последних исследований и публикаций

Известно применение эрлифтных установок ряда технологических схем – с расположением воздухопроводов вне и внутри подъемной трубы, групповых, секционных и др., в которых предусматривается нагнетание сжатого воздуха под избыточным давлением в погруженный под уровень жидкости смеситель и безнапорное движение транспортируемой жидкости (гидросмеси) после воздухоотделителя [1-4,8,9]. В этом случае давление в воздухоотделителе равно давлению окружающей среды (атмосферному давлению), и транспортирование жидкости (гидросмеси) к потребителю обеспечивается уклоном отводящего трубопровода в сторону последнего. Используемый в эрлифтах в качестве рабочего тела сжатый воздух производится нагнетателями (преимущественно радиальными), в которых давление атмосферного воздуха увеличивается до значения, соответствующего давлению в смесителе с учетом потерь в воздухопроводе [10-12].

В вакуумных эрлифтах смеситель, как правило, располагается на уровне перекачиваемой жидкости (гидросмеси), а вакуум в воздухоотделителе создается при помощи вакуум-насосов [4-6]. В этом случае начальный уровень отводящего безнапорного трубопровода ниже выходного сечения в воздухоотделителе на величину столба перекачиваемой жидкости (гидросмеси), уравновешивающего вакуум в воздухоотделителе.

В обоих типах рассмотренных эрлифтных установок обеспечивается только безнапорное движение перекачиваемой жидкости (гидросмеси) по отводящему трубопроводу, что ограничивает возможную геодезическую отметку ее потребителя отметкой входного сечения этого трубопровода.

Расширить энергоэффективную область применения эрлифтных установок увеличением высоты подъема транспортируемой жидкости (гидросмеси), превышающей уровень входного сечения безнапорного отводящего трубопровода, возможно обеспечением работы этого трубопровода в напорном режиме за счет избыточного давления в воздухоотделителе нагнетательного эрлифта и утилизацией энергии частично сжатого воздуха, выходящего из воздухоотделителя, подачей его на вход нагнетателя.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является обоснование энергетической целесообразности эксплуатации нагнетательных эрлифтных установок с радиальными (центробежными) воздушными нагнетателями как наиболее широко используемыми в качестве источников пневмоэнергии водовоздушных подъемников.

Основной материал исследования

Нагнетательная эрлифтная установка с радиальным нагнетателем содержит эрлифт с подъемной трубой 1, в верхней части которой расположен герметичный воздухоотделитель 2 со сливной 3 и воздухоотводящей 4 трубами (рис. 1). Управление регулирующим клапаном 5 осуществляется по сигналу датчика уровня 6.

К воздухоотводящей трубе 4 подключен патрубок 7 с клапаном 8, положение запорно-регулирующего элемента которого задается управляющим датчиком давления 9. При открытом клапане 8 патрубок 7 обеспечивает соединение воздухоотводящей трубы 4 с атмосферой.

Воздухоотводящая труба 4 через влагоотделитель 10 присоединяется к всасывающему пат-

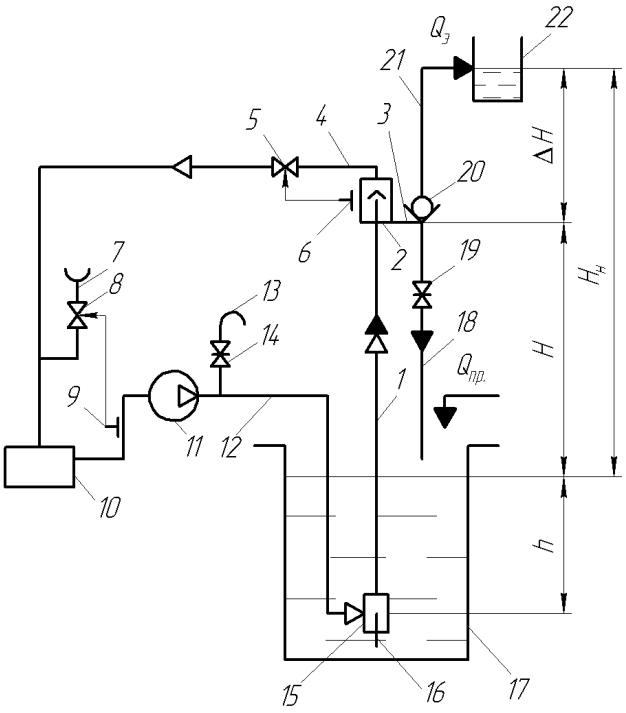


Рис. 1. Принципиальная схема нагнетательной эрлифтной установки:
1 − подъемная труба; 2 − воздухоотделитель; *3* − сливная труба; *4* − воздухоотводящая труба; *5*, *8* − регулирующие клапаны; *6* – датчик уровня; *7* − патрубок; *9* − датчик давления; *10* − влагоотделитель; *11* – радиальный нагнетатель; *12* − напорный воздухопровод; *13* − пусковой патрубок; *14*, *19* − задвижка; *15* − смеситель; *16* − подающая труба; *17* − зумпф; *18* − сбросной трубопровод; *20* − обратный клапан; *21* – отводящий трубопровод; *22* – потребитель перекачиваемой жидкости (гидросмеси)

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

рубку радиального нагнетателя 11. Напорный воздухопровод 12, оснащенный пусковым патрубком 13 с задвижкой 14, соединяет нагнетатель 11 со смесителем эрлифта 15 с подающей трубой 16.

Нижняя часть эрлифта расположена в зумпфе 17, куда направляется и перекачиваемая жидкость (гидросмесь) с расходом $Q_{пр}$.

Сбросной трубопровод 18 с задвижкой 19 подключен к сливной трубе 3. Обратный клапан 20 устанавливается на начальном участке отводящего трубопровода 21, обеспечивающего транспортирование жидкости (гидросмеси) к потребителю 22. В рассматриваемом случае напор, компенсирующий требуемую высоту подъема жидкости (гидросмеси) после ее выхода из воздухоотделителя 2 и возникающие гидравлические потери, составляет величину ΔH.

Ввод в работу нагнетательной эрлифтной установки с радиальным нагнетателем осуществляется в следующей последовательности.

При открытых клапане 8 и задвижке 14 запускается нагнетатель 11 − атмосферный воздух по патрубку 7 засасывается радиальной машиной, а по патрубку 13 − сбрасывается в атмосферу. Нагнетатель 11 выводится на стабильный режим работы.

В положении запорно-регулирующей арматуры задвижка 19 и клапан 5 − открыты, закрывается задвижка 14, и сжатый воздух по воздухопроводу 12 нагнетается в смеситель 15. Поступающая из зумпфа 17 через подающую трубу 16 жидкость (гидросмесь) смешивается в смесителе 15 со сжатым воздухом, образуя газожидкостную смесь (возможно − с включениями твердых частиц), которая по подъемной трубе 1 поднимается в воздухоотделитель 2. Выделившаяся из состава газожидкостной смеси жидкость (гидросмесь) по сливной трубе 3 и сбросному трубопроводу 18 возвращается в зумпф 17, а воздух из воздухоотделителя 2 удаляется по воздухоотводящей трубе 4. При открытом клапане 8 соотношения расходов воздуха по трубопроводам 4 и 7, всасываемого нагнетателем 11, определяются условиями параллельной работы этих трубопроводов. В таком положении запорно-регулирующей арматуры достигается устойчивая работа эрлифтной установки.

Для перевода эрлифтной установки в нагнетательный режим работы жидкость (гидросмесь) подается в зумпф 17, закрывается задвижка 19 и за счет частичного закрытия регулирующего клапана 5 и увеличения при этом его сопротивления обеспечивает давление в воздухоотделителе 2, соответствующее требуемому напору ΔH. Жидкость (гидросмесь) расходом $Q_э=Q_{пр}$ из воздухоотделителя 2 по сливной трубе 3, через обратный клапан 20 и дальше по отводящему трубопроводу 21 направляется потребителю 22.

Предотвращение затопления выходного сечения подъемной трубы 1 и возможного интенсивного влагоуноса воздушным потоком, что может иметь место в нештатных режимах работы установки, обеспечивается регулированием давления в воздухоотделителе 2 клапаном 5 по сигналу датчика уровня 6. Так, при превышении уровня жидкости (гидросмеси) относительно заданного, проходное сечение клапана 5 по сигналу датчика 6 уменьшается, давление в воздухоотделителе 2 повышается. При этом, с одной стороны, увеличивается расход транспортируемой жидкости (гидросмеси) из воздухоотделителя 2 к потребителю 22, а с другой − уменьшается подача эрлифта по подъемной трубе 1. И первое, и второе препятствует затоплению выходного сечения подъемной трубы 1.

Обратный клапан 20 исключает движение жидкости (гидросмеси) от потребителя 22 в воздухоотделитель 2 после выключения эрлифтной установки и не допускает ее попадания в проточную часть нагнетателя 11.

Утилизация энергии сжатого воздуха, поступающего с избыточным давлением из воздухоотделителя 2 по воздухоотводящей трубе 4 во всасывающий патрубок нагнетателя 11, реализуется согласованием работы регулирующих клапанов 5 и 8. При этом обеспечивается подача частично сжатого воздуха на вход нагнетателя 11 за счет максимально возможного закрытия проходного сечения клапана 8 (в штатном режиме работы установки − полное закрытие), при котором эрлифтная установка устойчиво работает в нагнетательном режиме. Это уменьшает потребную степень сжатия воздуха в нагнетателе и снижает энергозатраты на производство пневмоэнергии.

Оценку энергетической эффективности работы нагнетательной эрлифтной установки выполним на примере использования в ее составе радиального нагнетателя ЦНВ 200/3,0 (производство ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования» (Хабаровск)).

Согласно заводским характеристикам $p_{а\,н}=f(Q_н)$ и $\eta_н=f(Q_н)$, нагнетатель ЦНВ 200/3,0 развивает максимально возможное абсолютное давление сжатого воздуха $p_{а\,н\,макс}=3{,}05\cdot10^5$ Па при производительности $Q_н=168$ м^3/мин, обеспечивая в этом режиме работы значение КПД $\eta_н=0{,}781$. Такие параметры работы нагнетателя имеют место при нормальных технических условиях на его входе, то есть атмосферном давлении во всасывающем патрубке $p_{а\,вс}=p_0=1{,}013\cdot10^5$ Па ($p_{а\,вс}$ −

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

абсолютное давление во всасывающем патрубке, p_0 − атмосферное давление) и абсолютной температуре воздуха T=293 К. Максимально возможная степень сжатия нагнетателя при этом $\varepsilon_{макс}=p_{а\ н\ макс}/p_0=3{,}05\cdot10^5/1{,}013\cdot10^5=3{,}01$.

При транспортировании воды максимально возможное геометрическое погружение эрлифта составит:

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

где ρ – плотность воды, ρ=1000 кг/м^3; g – ускорение свободного падения, g=9,81 м/с^2.

Тогда из (1):

$$h_{макс}=\frac{(3{,}05-1{,}013)\cdot10^5}{1000\cdot9{,}81}=20{,}8\ \text{м}.$$

Известно [1,2,6], что для эрлифтов традиционной конструкции относительное погружение рекомендуется принимать в диапазоне от α≥0,15 до α→1. Верхний предел значения относительного погружения для общепромышленного эрлифта является сложно реализуемым, поэтому выполним анализ работы рассматриваемой эрлифтной установки в диапазоне относительных погружений 0,15≤α≤0,50, а методику анализа рассмотрим на примере значения относительного погружения α=0,3.

При заданных максимально возможном геометрическом, $h_{макс}$=20,8 м, и относительном, α=0,3, погружениях эрлифта высота его подъема составит:

$$H=\frac{h(1-\alpha)}{\alpha}=\frac{20{,}8(1-0{,}3)}{0{,}3}=48{,}5\ \text{м}.$$

Отнеся рассматриваемый эрлифт к классу коротких, в соответствии с рекомендациями [1], удельный расход воздуха составит:

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

откуда, при α=0,3, объемное количество воздуха, необходимое для транспортирования единицы объема жидкости (удельный расход воздуха), q=10,8.

Коэффициент полезного действия эрлифта [1]:

$$\eta_э=\frac{\rho\cdot g\cdot H}{q\cdot p_0\cdot ln\frac{p_{а\ см}}{p_0}}=\frac{\rho\cdot g\cdot H}{q\cdot p_0\cdot ln\frac{p_{а\ н\ макс}}{p_0}}, \qquad (3)$$

где $p_{а\ см}$ – абсолютное давление в смесителе; принимаем его равным $p_{а\ см}=p_{а\ н\ макс}$.

Тогда в соответствии с (3):

$$\eta_э=\frac{1000\cdot9{,}81\cdot48{,}5}{10{,}8\cdot1{,}013\cdot10^5\cdot ln\frac{3{,}05\cdot10^5}{1{,}013\cdot10^5}}=0{,}393.$$

КПД эрлифтной установки:

$$\eta_{эу}=\eta_э\eta_н, \qquad (4)$$

значение которого для рассматриваемого случая $\eta_{эу}$=0,393·0,781=0,307.

Подача эрлифта:

$$Q_э=\frac{60Q_в}{q}, \qquad (5)$$

откуда $Q_э$=60·168/10,8=930 м^3/ч.

Рассмотрим работу эрлифтной установки в нагнетательном режиме с тем же нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в диапазоне абсолютных давлений в воздухоотделителе $p_{а\ вз}$=(1,013-1,125)·10^5 Па. Пренебрегая гидравлическими потерями в воздухоотводящей трубе 4 (рис. 1), принимаем, что давление частично сжатого воздуха на входе в нагнетатель 11 $p_{вс}$ равно давлению в воздухоотделителе 2, то есть $p_{а\ вз}=p_{а\ вс}$.

С использованием известной методики [7] графическим методом построены газодинамические характеристики нагнетателя ЦНВ 200/3,0 при давлениях во всасывающем патрубке в оговоренном диапазоне (рис. 3).

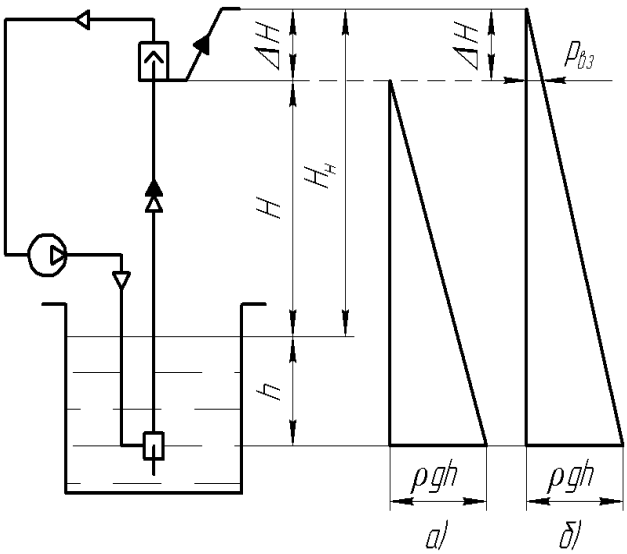


Рис. 2. Эпюры давлений в подъемных трубах эрлифта традиционной технологической схемы (*а*) и нагнетательного эрлифта (*б*)

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

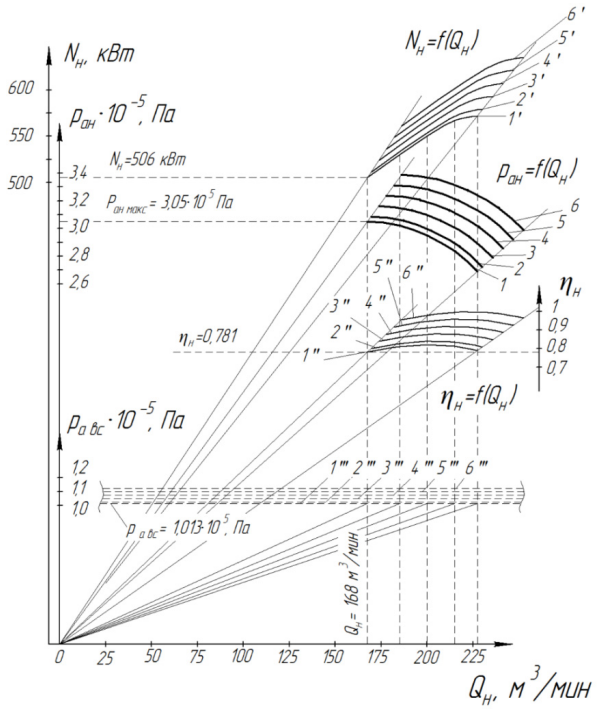


Рис. 3. Газодинамические характеристики нагнетателя ЦНВ 200/3,0 при абсолютных давлениях во всасывающем патрубке $p_{а\,вс}$=(1,013-1,125)·10^5 Па:
1 − 1,013·10^5 Па; *2* − 1,025·10^5 Па;
3 − 1,050·10^5 Па; *4* − 1,075·10^5 Па;
5 − 1,10·10^5 Па; *6* − 1,125·10^5 Па;
1-6 − $p_{а\,н}=f(Q_н)$; *1'-6'* − $N_н=f(Q_н)$;
1''-6'' − $\eta_н=f(Q_н)$; *1'''÷6'''* − $p_{а\,вс}$=const

Численный анализ параметров работы нагнетательной эрлифтой установки выполним на примере давления в воздухоотделителе (во всасывающем патрубке нагнетателя) $p_{а\,вз}=p_{а\,вс}$= =1,125·10^5 Па. В соответствии с построенными газодинамическими характеристиками нагнетателя (рис. 3) его работа при указанном давлении ($p_{а\,вс}$=1,125·10^5 Па) характеризуется следующими параметрами: $p_{а\,н\,макс}$=3,38·10^5 Па; $Q_н$=186 м^3/мин; $\eta_н$=0,956; $\varepsilon_{макс}$=3,0.

В соответствии с (1) и (2) максимально возможное геометрическое погружение смесителя и высота подъема эрлифта при работе по традиционной технологической схеме и относительном погружении α=0,3 соответственно составят: $h_{макс}$=24,1 м, H=56,3 м.

Избыточное давление в воздухоотделителе $p_{вз}=p_{а\,вз}-p_0$ позволяет обеспечить переподъем жидкости относительно входного сечения сливной трубы 3 (рис. 1) на величину ΔH (рис. 2).

Из эпюры давления в подъемной трубе нагнетательного эрлифта (рис. 2*б*) правомерно:

$$\frac{p_{вз}}{\rho\cdot g\cdot h}=\frac{\Delta H}{h+H+\Delta H}, \qquad (6)$$

откуда:

$$\Delta H=\frac{p_{вз}\cdot(H+h)}{\rho\cdot g\cdot h-p_{вз}}=\frac{(p_{а\,вс}-p_0)\cdot(H+h)}{\rho\cdot g\cdot h-(p_{а\,вс}-p_0)} \qquad (7)$$

Тогда в соответствии с (7) высота переподъема нагнетательного эрлифта при $p_{а\,вс}$= =1,125·10^5 Па:

$$\Delta H=\frac{(1{,}125-1{,}013)\cdot10^5\cdot(56{,}3+24{,}1)}{1000\cdot9{,}81\cdot24{,}1-(1{,}125-1{,}013)\cdot10^5}=3{,}99\text{ м}.$$

Высота подъема нагнетательного эрлифта от уровня свободной поверхности перекачиваемой жидкости (гидросмеси) в зумпфе установки:

$$H_н=H+\Delta H, \qquad (8)$$

что для рассматриваемого случая составит: $H_н$= =56,3+3,99=60,3 м.

Относительное погружение нагнетательного эрлифта:

$$\alpha_н=\frac{h}{H_н+h}. \qquad (9)$$

Данная величина для нагнетательного эрлифта с h=24,1 м и $H_н$=60,3 м равняется $\alpha_н$=0,286, а удельный расход воздуха в соответствии с (2) - q=12,1.

Выражение для КПД нагнетательного эрлифта, исходя из (3), преобразуется к виду:

$$\eta_{эн}=\frac{\rho\cdot g\cdot H_н}{q\cdot p_0\cdot\ln\dfrac{p_{а\,н\,макс}}{p_{а\,вз}}} \qquad (10)$$

Тогда КПД нагнетательного эрлифта в рассматриваемых условиях в соответствии с (10) составит:

$$\eta_{эн}=\frac{1000\cdot9{,}81\cdot60{,}3}{12{,}1\cdot1{,}013\cdot10^5\cdot\ln\dfrac{3{,}38\cdot10^5}{1{,}125\cdot10^5}}=0{,}440,$$

а КПД эрлифтной нагнетательной установки в соответствии с (4) – $\eta_{эу\,н}$=0,440·0,956=0,421. Подача эрлифта согласно (5) равна: $Q_э$=60·186/ /12,1=925 м^3/ч.

По изложенной методике вычислены значения параметров, характеризующих работу нагнетательной эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в диапазоне абсолютных давлений

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

в воздухоотделителе $p_{а\,вз}$=(1,013-1,125)·10^5 Па (рис. 4). При графическом построении (рис. 4) зависимостей $\varepsilon_{макс} = f(\overline{p}_{а\,вз})$, $\overline{Q}_н = f(\overline{p}_{а\,вз})$, $\overline{h}_{макс} = f(\overline{p}_{а\,вз})$, $\overline{H} = f(\overline{p}_{а\,вз})$, $\Delta\overline{H} = f(\overline{p}_{а\,вз})$, $\overline{H}_н = f(\overline{p}_{а\,вз})$, $\alpha_н = f(\overline{p}_{а\,вз})$, $q = f(\overline{p}_{а\,вз})$, $\eta_э = f(\overline{p}_{а\,вз})$, $\eta_{эу} = f(\overline{p}_{а\,вз})$, $\overline{Q}_э = f(\overline{p}_{а\,вз})$ при вычислении безразмерных величин $\overline{p}_{а\,вз}$, $\overline{Q}_н$, $\overline{h}_{макс}$, $\overline{H}$, $\overline{H}_н$, $\overline{Q}_э$ в качестве базовых принимались значения соответствующих параметров при работе эрлифтной установки традиционной технологической схемы, а при вычислении $\Delta\overline{H}$ – значение ΔH при $p_{а\,вз}$=1,125·10^5 Па.

Как следует из результатов вычислений (рис. 4) параметров работы нагнетательной эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 (при относительном погружении смесителя установки традиционной схемы α=0,3), в диапазоне абсолютных давлений в воздухоотделителе $p_{а\,вз}$=(1,013-1,125)·10^5 Па высота подъема $H_н$ может быть увеличена на 24,3 %, КПД эрлифта $\eta_э$ – на 12,0 %, КПД эрлифтной установки $\eta_{эу}$ – на 37,1 %.

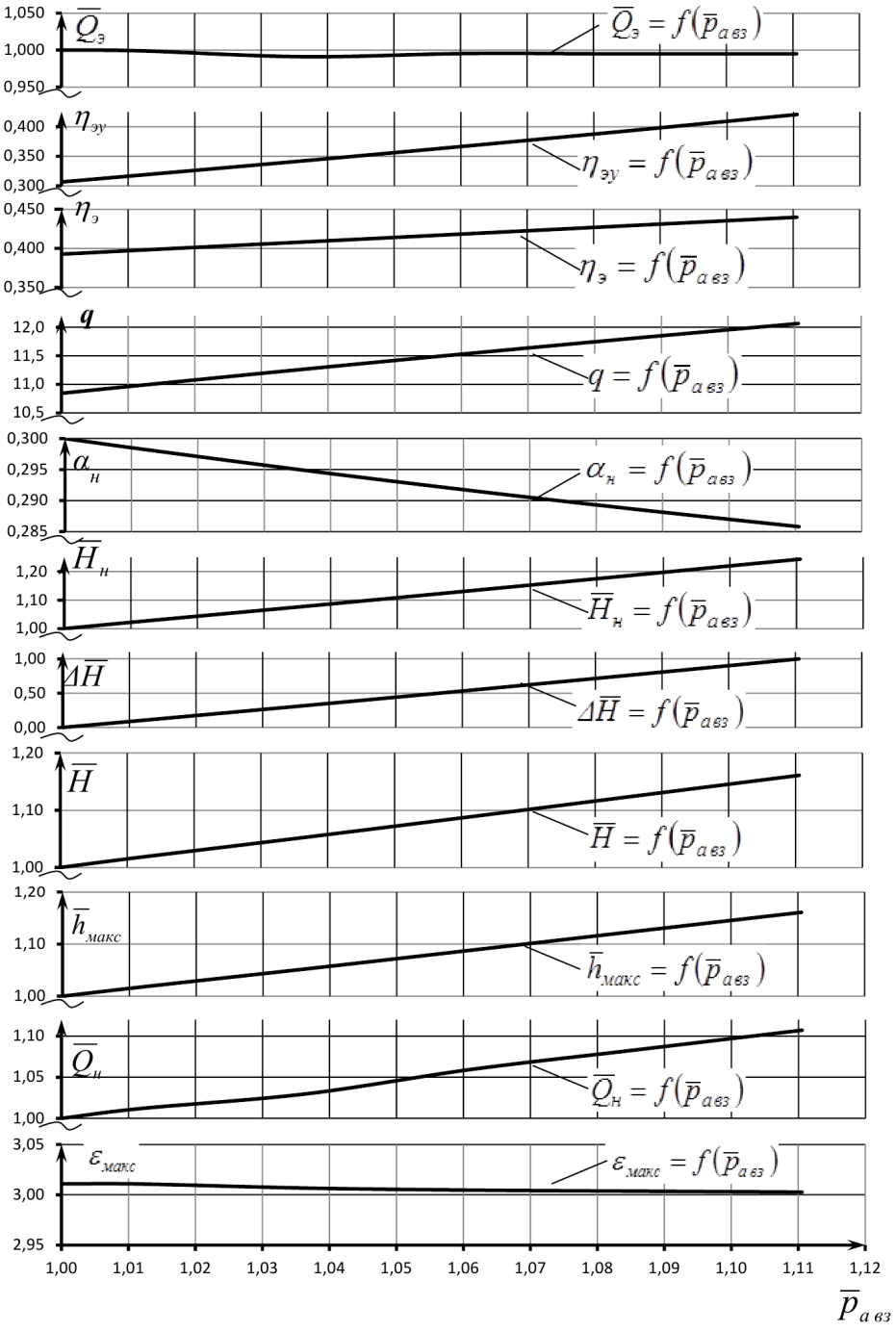


Рис. 4. Изменение безразмерных параметров рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 при относительном погружении α=0,30

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

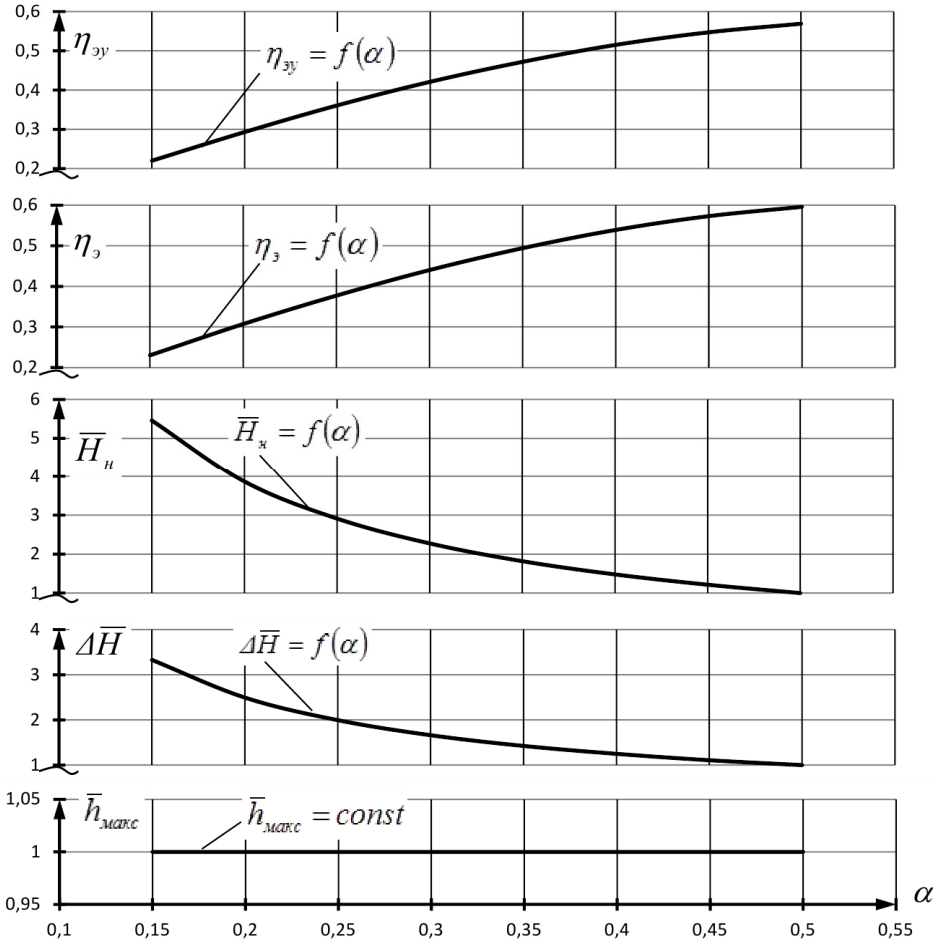


Рис. 5. Изменение безразмерных параметров рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в диапазоне относительных погружений α=0,15-0,50

Увеличение высоты подъема нагнетательного эрлифта $H_н$ (при α=0,3 – *idem*) при росте давления в воздухоотделителе $p_{а\,вз}$=$p_{а\,вс}$ обеспечивается как увеличением максимально возможных давления нагнетателя $p_{а\,н\,макс}$ и геометрического погружения смесителя $h_{макс}$ в соответствии с (1), а следовательно, и высоты подъема H, так и высотой переподъема ΔH (8).

Увеличение в рассматриваемых условиях КПД эрлифта (10) $\eta_э$ и КПД эрлифтной установки $\eta_{эу}$ объясняется большей степенью интенсивности увеличения высоты подъема $H_н$ в сравнении с интенсивностью увеличения удельного расхода воздуха q (из-за уменьшения относительного погружения нагнетательного эрлифта $\alpha_н$), а также повышением КПД нагнетателя $\eta_н$ при увеличении давления воздуха во всасывающем патрубке $p_{а\,вс}$=$p_{а\,вз}$.

В рассмотренном диапазоне абсолютных давлений в воздухоотделителе $p_{а\,вз}$=$p_{а\,вс}$= =(1,013-1,125)·10^5 Па максимально возможная степень сжатия нагнетателя $\varepsilon_{макс}$ и подача эрлифта $Q_э$ практически неизменные (рис. 4).

Анализ работы нагнетательной эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в режиме его работы $p_{а\,вс}$=1,125·10^5 Па, $p_{а\,н\,макс}$=3,38·10^5 Па, $Q_н$=186 м^3/мин при каждом из относительных погружений смесителя установки традиционной технологической схемы из диапазона α=0,15-0,5 (рис. 5) позволил установить характер зависимостей $\overline{h}_{макс} = f(\alpha)$, $\Delta\overline{H} = f(\alpha)$, $\overline{H}_н = f(\alpha)$, $\eta_э$=f(α), $\eta_{эу}$=f(α). При вычислении безразмерных величин $\overline{h}_{макс}$, $\Delta\overline{H}$, $\overline{H}_н$ в качестве базовых принимались значения соответствующих параметров работы нагнетательной эрлифтной установки с относительным погружением α=$h_{макс}$/(H+$h_{макс}$)=0,5.

Неизменное значение максимального геометрического погружения эрлифта $h_{макс}$ при каждом из относительных погружений смесителя α=0,15-0,5 (рис. 5) объясняется тем, что для всех рассматриваемых вариантов работы установки принят режим работы нагнетателя с давлением $p_{а\,н\,макс}$=3,38·10^5 Па.

Уменьшение высоты переподъема ΔH и высоты подъема $H_н$ нагнетательного эрлифта с увеличением относительного погружения α эрлифтной установки традиционной технологической схемы (рис. 5) вызвано уменьшением высоты подъема H при неизменном геометрическом по-

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

гружении $h_{макс}$. При этом увеличение высоты подъема $H_н$ нагнетательного эрлифта в сравнении с эрлифтом традиционной технологической схемы составляет 22,9-27,4 % в диапазоне относительных погружений α=0,15-0,5.

Увеличение КПД нагнетательного эрлифта $\eta_э$ от 0,230 до 0,596 и КПД нагнетательной эрлифтной установки $\eta_{эу}$ от 0,220 до 0,569 с увеличением относительного погружения α от 0,15 до 0,50 (рис. 5) обосновывается при этом большей интенсивностью уменьшения удельного расхода воздуха q в сравнении с интенсивностью уменьшения высоты подъема $H_н$. Увеличение КПД нагнетательного эрлифта в сравнении с КПД эрлифта традиционной технологической схемы составляет 10,6-15,1 %, а КПД нагнетательной эрлифтной установки – 35,8-40,8 % в диапазоне относительных погружений α=0,15-0,5.

Выводы

Доказано, что в сравнении с эрлифтной установкой традиционной технологической схемы работа эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в нагнетательном режиме обеспечивает увеличение высоты подъема жидкости (гидросмеси) на 22,9-27,4 % при увеличении КПД эрлифта на 10,6-15,1 %, а КПД эрлифтной установки – на 35,8-40,8 % в диапазоне относительных погружений α=0,15-0,5.

Необходимо выполнить анализ работы эрлифтных установок в нагнетательном режиме при использовании в их составе других типоразмеров радиальных нагнетателей производства ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования» (г. Хабаровск, РФ), что обеспечит расширение области их применения.

Список литературы

1. Эрлифтные установки: учебное пособие // В.Г. Гейер, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пащенко, Я.К. Антонов. – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.
2. Энциклопедия эрлифтов // Ф.А. Папаяни, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пащенко, А.П. Кононенко – М.: Информсвязьиздат, 1995. – 592 с.
3. Кононенко, А.П. Опыт применения эрлифтных установок в технологических системах ТЭС / А.П. Кононенко, В.И. Мизерный, Л.Л. Глухман // Енергетика та електрифікація. – 2006. – №11. – С. 8-12.
4. Малеев, В.Б. Водоотлив и дегазация угольных шахт / В.Б. Малеев, В.А. Малашкина. – М.: Недра, 1995. – 208 с.
5. Малеев, В.Б. Исследование и разработка сифонно-вакуумного эрлифта для очистки шахтных водоотливных емкостей: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Малеев Виктор Борисович. – Донецк: ДПИ, 1980. – 289 с.
6. Кононенко, А.П. Оптимизация параметров газожидкостных подъемников / А.П. Кононенко, Т.А. Устименко // Промислова гідравліка і пневматика. – 2010. – №3(29). – С. 51-53.
7. Рис, В.Ф. Центробежные компрессорные машины. – М.-Л: Машиностроение, 1964. – 336 с.
8. Mansour, H. Effect of air injection method on the performance of airlift pump / H. Mansour, M.F. Khalil // Mansoura Eng. J. – 1990. – No.15(2). – P. 107-118.
9. Khalil, M.F. Effect of air injection method on the performance of an airlift pump / M.F. Khalil, K.A. Elshorbagy, S.Z. Kassaband, R.I. Fahmy // Int. J. Heat and Fluid Flow. – 1999. – No.20. – P. 598-604.
10. Кононенко, А.П. Зоны энергетически целесообразного использования эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы / А.П. Кононенко, М.Ю. Карпушин, К.Ю. Кононенко // Наук. пр. Донецького національного технічного університету. – 2013. – Вип.1(25). – С. 88-95. (сер.: гірничо-електромеханічна).
11. Кононенко, А.П. Подача эрлифтов с блочным воздухоснабжения центробежными нагнетателями / А.П. Кононенко, В.В. Чернюк, М.Ю. Карпушин // Наук. пр. Донецького національного технічного університету. – 2012. – Вип.23(196). – С.110-123. (сер.: гірничо-електромеханічна).
12. Кононенко, А.П. Подача эрлифтных установок с источниками пневмоэнергии неизменной производительности / А.П. Кононенко, М.Ю. Карпушин // Наук. пр. Донецького національного технічного університету. – 2012. – Вип.2(24). – С. 118-132. (сер.: гірничо-електромеханічна).

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

SUBSTANTIATION OF THE ENERGY FEASIBILITY OF THE USE OF PRESSURE AIRLIFT INSTALLATIONS WITH RADIAL SUPERCHARGERS

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

Background. *In airlift units of the traditional technological scheme, the movement of the liquid (slurry) is carried out after the air-purge drum pressure-free, that requires the discharge pipe bias in the direction of the ultimate consumer of the liquid (slurry) that is a certain height of the rise by airlift to the consumer. In some cases, there are restrictions on the possible lifting height of the airlift of the traditional schemes due to the limited vertical dimensions at the location of the installation (for example, limiting by the vertical dimensions of the mine workings, cluttering of the space, etc.) that precludes the use of such facilities as a hydro lift. The movement of the liquid (slurry) in the discharge pipe with the upward bias is only possible at an absolute pressure in the air-purge drum exceeding the absolute pressure at the consumer of the pumped liquid (slurry).*

Materials and/or methods. *To minimize the loss of energy efficiency of an airlift installation with a radial (centrifugal) supercharger as a source of pneumatic energy is possible when feeding into the suction pipe of the last partially compressed air with an overpressure, occurring in the air-purge drum. This arrangement of airlift installations will expand the scope of their application.*

Results. *The evaluation of the energy efficiency of the pressure airlift installation is made on the example of the use in its composition of a radial supercharger ЦНВ 200/3.0 as one of the most widely used as a source of pneumatic energy air assisted lifts. Using known methods, graphically built are the gas-dynamic characteristics of the ЦНВ 200/3.0 supercharger when the pressure in the suction pipe is within a specified range. The numerical analysis of working parameters of the airlift installation is made on the maximum, within the specified range, pressure values in the air-purge drum (in the suction pipe of the supercharger). The excess pressure in the air-purge drum allows the rise of the liquid relative to the inlet section of the drain pipe on the magnitude of* ΔH.

Conclusion. *It is proved that in comparison with the airlift installation of traditional technological schemes the work of an airlift installation with the ЦНВ 200/3.0 supercharger in the discharge mode provides an increase in rising height of the liquid (slurry) of 22.9 to 27.4 percent by increasing the efficiency of the airlift by 10.6-15.1 %, and the efficiency of the airlift installation – by 35.8-40.8 % in the range of relative dives* α*=0.15-0.5.*

Keywords*: pressure airlift, radial supercharger, rising height, energy efficiency.*

Сведения об авторах

А.П. Кононенко
SPIN-код: 3828-6755
Телефон: +380 (95) 251-25-52
Эл. почта: ap.kononenko@ukr.net

Р.И. Божко
SPIN-код: 2510-2591
Телефон: +380 (50) 897-20-92
Эл. почта: bozhko342@mail.ru

Статья поступила 11.04.2017 г.
© А.П. Кононенко, Р.И. Божко, 2017
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин



НОВИНКИ ИЗД-ВА «ДОНЕЦКАЯ ПОЛИТЕХНИКА»

Заметки по некоторым разделам линейной алгебры и аналитической геометрии: монография / Л.П. Мироненко. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2016. – 306 с.: ил., табл. ISBN 978-966-8248-79-5

Представлены альтернативные пути решения многих классических задач линейной алгебры и аналитической геометрии. Основное внимание уделяется вопросам, которые, по мнению автора, недостаточно освещены в учебной литературе.

Особое внимание уделено теории кривых третьего порядка. Рассматривается проблема Великой теоремы Ферма. Материал монографии носит оригинальный характер и отсутствует в отечественной литературе.

УДК 629.4.032

А.С. Красулин
ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» (Мариуполь)

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРУГОГО ПОДВЕШИВАНИЯ КАТКОВ МАНЕВРОВОГО ТЯГАЧА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЯГОВОГО УСИЛИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ХОДА

В статье освещаются параметры упругого подвешивания направляющих катков маневрового тягача на комбинированном ходу, которые должны обеспечивать необходимое тяговое усилие, устойчивость хода и прохождение в кривых малых радиусов в сцепе с вагонами.

Ключевые слова: *железнодорожно-автомобильный ход, упругое подвешивание, упругий элемент, критерий устойчивости.*

Постановка проблемы

Для эффективности транспортного обслуживания предприятий различных отраслей промышленности разработана новая энергосберегающая транспортная технология с использованием маневрового тягача ТМ1.175 на базе колесного трактора ХТЗ150К-09 с оборудованием комбинированного железнодорожно-автомобильного хода.

Маневровый тягач успешно прошел промышленные испытания на металлургическом комбинате им. Ильича (г. Мариуполь), и уже на протяжении шести лет несколько единиц используются на предприятиях России.

Однако промышленное применение маневровых тягачей показало, что для повышения надежности их использования в сложных эксплуатационных условиях необходима отработка оптимальных параметров упругого подвешивания направляющих катков для обеспечения тягового усилия, устойчивости хода и вписывания в кривые малых радиусов (50-80 м) и др.

Анализ последних исследований и публикаций

В последнее время в России, Украине и странах СНГ в вопросах реализации тяговых усилий, устойчивости хода и прохождения в кривых малых радиусов уделялось внимание в основном железнодорожному подвижному составу – вагонам и тяговым средствам (локомотивам). Обращает на себя внимание отсутствие статей по вопросу устойчивости и проходимости в кривых малых радиусов маневровых тяговых средств на комбинированном ходу. По существу, следует отметить лишь работы [1-4], в которых рассматриваются вопросы взаимодействия ходовых частей с рельсовыми путями локомотивов и транспортных средств на комбинированном ходу. Однако вопросам оптимальных параметров упругого подвешивания направляющих катков маневровых тяговых средств на комбинированном ходу не уделяется должного внимания.

Цель (задачи) исследования

Целью работы является определение оптимальных параметров упругого подвешивания направляющих катков маневрового тягача.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определить величину начального поджатия упругих элементов направляющих катков, а также определить коэффициент устойчивости от выжимания гребня катка боковыми силами.

Основной материал исследования

В настоящем исследовании на основе проведения промышленных испытаний маневрового тягача [5-7] решается задача нахождения оптимальной нагрузки на направляющие катки по условию обеспечения максимального сцепного веса.

Для обеспечения необходимого сцепного веса, в соответствии с известной методикой [3], применяемой к тепловозам, должно выполняться условие, при котором суммарная сила сцепления колес с рельсами должна быть не менее усилия тяги F_m:

$$1000 \cdot \psi \cdot P_{сц} \geq F_T, \qquad (1)$$

где ψ – коэффициент сцепления колес с рельсами; $P_{сц}$ – сцепная масса тягового средства, т.

Однако применительно к маневровому тягачу на комбинированном ходу использование данной методики в полной мере некорректно, т.к. в конструкции тягача реализация тяговых усилий осуществляется сцепным весом, приходящимся на приводные пневмоколеса, а

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

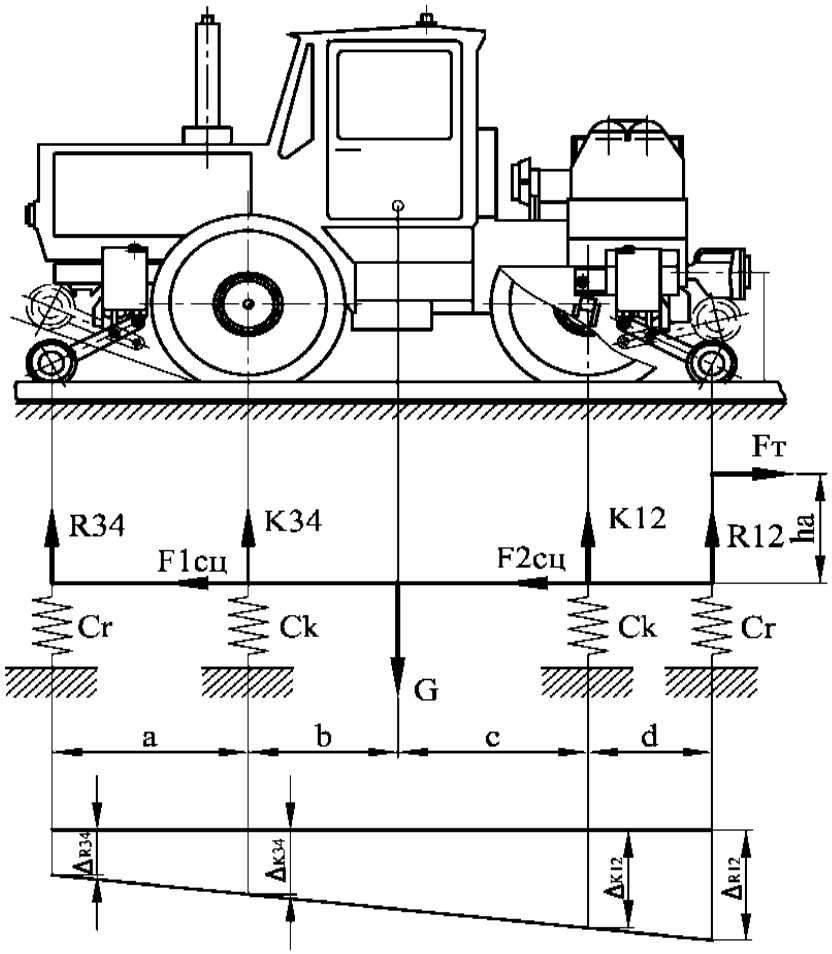


Рис. 1. Расчетная схема для определения неизвестных усилий (овальные колеса):
R_{12} и R_{34} – суммарное усилие на задние и передние направляющие катки;
K_{12} и K_{34} – усилие на заднюю и переднюю ось резиновых колес; $F_{1сц}$, $F_{2сц}$ – усилие сцепления резиновых колес с рельсами; G – сила тяжести тракторного тягача; F_T – тяговое усилие;
Cr и Ck – жесткость катковых и колесных пружин; ΔR_{12} и ΔR_{34} – прогибы упругих элементов задней и передней осей направляющих катков; ΔK_{12} и ΔK_{34} – прогибы покрышек задней и передней осей резиновых колес; h_a – высота оси автосцепки над уровнем головки рельсов;
Δ_{012}, Δ_{034} – начальное поджатие упругих элементов (при стоячем тягаче) на передних и задних направляющих роликах

также в конструкции присутствуют направляющие катки, которые не участвуют в реализации силы тяги. Данное положение сводится к решению задачи с несколькими неизвестными. Для реализации данной задачи предлагается новая методика применительно к маневровому тягачу с рассмотрением схемы распределения и определения неизвестных усилий, представленной на рис. 1. В схеме принято, что маневровый тягач движется с постоянной скоростью на прямом участке пути. В этом случае поперечные силы будут отсутствовать, а система продольных и вертикальных сил будет симметричной относительно плоскости симметрии тягача.

Нагрузка на один направляющий каток определяется следующей зависимостью:

$$R=C_r(\Delta R+\Delta_0), \qquad (2)$$

где C_r – жесткость упругого элемента под одним катком; ΔR – поджатие упругого элемента катка, возникающее при движении; Δ_0 – начальное поджатие упругого элемента (при стоячем тягаче).

Таким образом, получить необходимое значение этой нагрузки можно, варьируя жесткость упругих элементов C_r и величину начального поджатия Δ_0.

Коэффициент жесткости одного упругого элемента определяется как отношение произведения модуля упругости и площади элемента к его толщине:

$$C_r=\frac{EF}{t}, \qquad (3)$$

где F – площадь упругого элемента, см^2; t – тол-

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

щина упругого элемента, см; E – модуль упругости, МПа.

Для нахождения неизвестных усилий в соответствии со схемой, представленной на рис. 1, составим систему двух независимых уравнений равновесия:

$$\begin{cases} \sum F_z = 0; R_{12}+R_{34}+K_{12}+R_{34}-G=0, \\ \sum M_y = 0; R_{12}(c+d)-R_{34}(a+b)+ \\ \quad +R_{12}\cdot c - R_{34}\cdot b - F_T\cdot h_a = 0. \end{cases} \quad (4)$$

В данной системе уравнений (4) имеются 4 неизвестные (R_{12}, R_{34}, K_{12} и K_{34}), поэтому, предполагая, что рама тягача абсолютно жесткая, составим дополнительные уравнения совместности деформаций:

$$\begin{cases} \dfrac{\Delta K_{34}-\Delta R_{34}}{a} = \dfrac{\Delta K_{12}-\Delta K_{34}}{b+c} \\ \dfrac{\Delta K_{34}-\Delta R_{34}}{a} = \dfrac{\Delta R_{12}-\Delta R_{34}}{d} \end{cases}. \quad (5)$$

В уравнения (5) произведем следующие подстановки:

$$\Delta R_{12} = \frac{R_{12}}{2C_r} - \Delta_{012},$$

$$\Delta R_{34} = \frac{R_{34}}{2C_r} - \Delta_{034},$$

$$\Delta K_{12} = \frac{K_{12}}{2C_k},$$

$$\Delta K_{34} = \frac{K_{34}}{2C_k}. \quad (6)$$

В результате чего, после проведения алгебраических преобразований, получим систему уравнений, которая будет иметь вид:

$$\begin{cases} R_{12}+R_{34}+K_{12}+K_{34}-G=0 \\ R_{12}(c+d)-R_{34}(a+b)+R_{12}c-K_{34}b-F_Th_a=0 \\ -R_{34}\dfrac{b+c}{C_r}-K_{12}\dfrac{a}{2C_k}+K_{34}\dfrac{a+b+c}{2C_k}= \\ \quad =-\Delta_{34}(b+c) \\ R_{12}\dfrac{a}{2C_r}+R_{34}\dfrac{d}{2C_r}-K_{12}\dfrac{a}{2C_k}-K_{34}\dfrac{d}{2C_k}= \\ \quad =\Delta_{012}a+\Delta_{034}d \end{cases}, \quad (7)$$

или в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ c+d & -(a+b) & c & -b \\ 0 & -\dfrac{b+c}{2C_r} & -\dfrac{a}{2C_k} & \dfrac{a+b+c}{2C_k} \\ \dfrac{a}{2C_r} & \dfrac{d}{2C_r} & -\dfrac{a}{2C_k} & -\dfrac{d}{2C_k} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{12} \\ R_{34} \\ K_{12} \\ K_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \\ F_Th_a \\ -\Delta_{034}(b+c) \\ \Delta_{012}a+\Delta_{034}d \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Применительно к маневровому тягачу, для обеспечения силы тяги необходимо, чтобы выполнялось условие, что сила тяги не должна превышать суммарную силу нажатия пневмоколес, с учетом коэффициента трения сцепления резины по стали:

$$\mu(K_{12}+K_{34}) \geq F_T, \quad (9)$$

где μ – коэффициент трения резины по стали (μ=0,65).

Задача обеспечения условия (9) сводится к подбору величины начального поджатия упругих элементов направляющих катков $\Delta 0_{12}$ и $\Delta 0_{34}$. Учитывая тот факт, что автосцепка устанавливается как спереди, так и сзади тягача, а также с целью упрощения регулировки, наиболее рациональным будет принять начальное поджатие упругих элементов одинаковым для всех катков: $\Delta 0_{12}=\Delta 0_{34}=\Delta 0$.

Определение величины начального поджатия упругих элементов направляющих катков осуществляется из системы (8) в программе MathCAD по следующим исходным данным: a=1653 мм; b=1259 мм; c=1604 мм; d=1044 мм; C_k=1,5 кН/мм; F_T=30 кН; G=120 кН; h_a=1010 мм; и жесткости одного упругого элемента (C_r), которую определяем в соответствии с формулой (3) для элементов направляющих катков, изготовленных из эластомера, имеющего следующие параметры:

– площадь упругого элемента, F=226 см^2;

– толщина упругого элемента, t=20 см;

– модуль упругости, E=6,0 МПа.

Таким образом, значение коэффициента жесткости одного упругого элемента составит:

$$C_r = (60\cdot 226)/20 = 678 \text{ кгс/см}.$$

Результаты расчетов (8) показывают, что для обеспечения тягового усилия 30 кН на участке пути необходимо, чтобы величина поджатия упругих элементов была $\Delta_0 \leq 12{,}3$ мм.

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

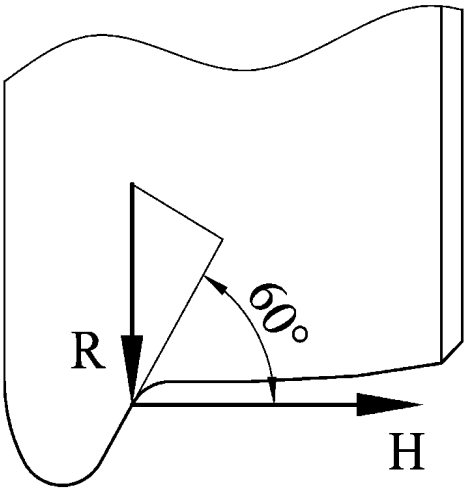


Рис. 2. Схема сил, действующих на гребень катка в кривой

Однако величину начального поджатия упругого элемента роликового катка необходимо проверить по критерию безопасности – условию недопущения вползания гребня катка на головку рельса.

Условие недопущения вползания гребня колеса на рельс будет выполняться в том случае, если суммарное действие всех приложенных к колесной паре сил окажется достаточным для обеспечения непрерывного скольжения вниз гребня катка по боковой поверхности рельса (рис. 2). Для этого должно выполняться неравенство:

$$R \cdot sin(\alpha) > H \cdot cos(\alpha) + \mu \cdot H \cdot sin(\alpha) + \mu \cdot R \cdot cos(\alpha), \quad (10)$$

где R – нагрузка от катка на рельс; H – боковое давление гребня катка на рельс; α – угол наклона реборды катка; μ – коэффициент трения.

Гребень катка не будет вползать на головку рельса, если выполняется условие:

$$K_{yc} = \frac{H}{R} \le \frac{tg(\alpha) - \mu}{1 + \mu \cdot tg(\alpha)}. \quad (11)$$

На основании формулы (11) и рис. 2 определяем критерий безопасности, который при угле реборды катка α=60° и коэффициенте сцепления колеса с рельсом μ=0,25 будет равным:

$$\frac{tg60^\circ - 0{,}25}{1 + 0{,}25 \cdot tg60^\circ} = 1{,}034.$$

В соответствии с [3,4] нормативное значение критерия безопасности должно быть равно $K_{yc}^{\,н}$=0,7, а расчетное получилось больше – $K_{yc}^{\,р}$=1,034, т.е. условие (11) будет иметь вид:

$$\frac{H}{R} \le 0{,}7.$$

Предложенная методика определения параметров упругого подвешивания направляющих катков для реализации тяговых усилий и устойчивости хода позволила получить: $K_{yc}^{\,р} \ge K_{yc}^{\,н}$. Для реализации тяговых усилий маневрового тягача полученное соотношение критерия безопасности в полной мере обеспечивает необходимые параметры упругого подвешивания и профиля направляющих катков.

Выводы

Для сложной конструкции комбинированного хода маневрового тягача разработана методика определения параметров упругого подвешивания направляющих катков для реализации тяговых усилий и устойчивости хода.

Проверка параметров упругого подвешивания направляющих катков маневрового тягача и коэффициента устойчивости по указанной методике показала, что величина начального поджатия упругих элементов, которая составила $\Delta_0 \le 12{,}3$ мм, обеспечивает тяговое усилие в 30 кН, а значение коэффициента устойчивости в полной мере отвечает критерию безопасности при прохождении маневрового тягача на комбинированном ходу в кривых участках пути радиусом до 60 м.

Список литературы

1. Теория и конструкция локомотивов: учебник для вузов / Г.С. Михальченко [и др.]. – М.: Маршрут, 2006. – 584 с.
2. Пузанков, А.Д. Выбор основных параметров, расчет и конструирование тепловозов. – М.: МИИТ, 2003. – 47 с.
3. Камаев, А.А. Взаимодействие локомотивов и пути в кривых участках пути: уч. пос. / А.А. Камаев, Г.С. Михальченко. – Тула: Тульский политехнический институт, 1977. – 68 с.
4. Бардышев, О.А. Машины на комбинированном ходу / О.А. Бардышев. А.В. Кудряшов, В.И. Тэттэр. – М.: Транспорт, 1975. – 136 с.
5. Парунакян, В.Э. Энергоэффективная транспортная технология для предприятий и производственно-складских объектов с ограниченным вагонопотоком / В.Э. Парунакян, А.С. Красулин // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2012. – №4(175). – С. 216-222.
6. Промышленная проверка эксплуатационно-технических показателей маневрового тягача в условиях металлургического комбината / В.Э. Парунакян [и др.] // Захист металургій-

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

них машин від поломок: зб. наук. пр. ПДТУ. – 2010. – Вип.12. – С. 111-117.
7. Parunakjan, V. Increase of efficiency of interaction of production and transport in the logistic chains of material traffic of enterprises / V. Parunakjan, E. Sizova // Problemy Transportu: Czasopismo Naukowe. – Gliwice: Politechniki Slaskiej, 2008. – T.3, z.3, c.II. – S. 95-104.

A.S. Krasulin
Pryazovskyi State Technical University (Mariupol)

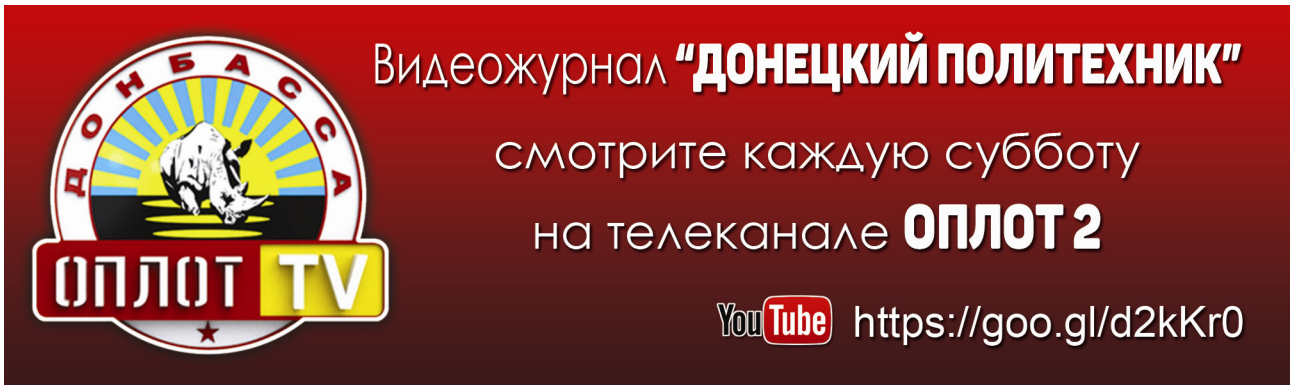
PARAMETERS SUBSTANTIATION FOR ELASTIC SUSPENSION ROLLERS OF SHUNTING TRACTOR TO PROVIDE TRACTION AND MOTION STABILITY

Background. *The industrial tests of shunting tractors showed that to improve the reliability of their use in difficult operating conditions the parameters optimization of the elastic suspension of the guide rollers to ensure traction, stability and fit the curves of small radius (50-80 m) is required. Substantiation of the parameters of the elastic suspension of the guide rollers of shunting tractor on combined wheels to ensure traction and stability in the curved sections of the railway track is an actual scientific and technical problem.*
Materials and/or methods. *The objective of this paper is to determine the optimal parameters of the elastic suspension of the guide rollers of shunting tractor. To achieve this objective, a method is developed for determining the initial preload of the elastic elements of the rollers and the coefficient of stability from side forces pressing the roller guide.*
Results. *The proposed method allows determining the necessary parameters of the elastic suspension of the guide rollers of shunting tractor and the stability coefficient. This technique showed that the magnitude of initial preload of the elastic elements, which amounted to* $\Delta 0 \leq 12.3$ *mm, provides tractive force of 30 kN, and the value of the stability coefficient fully meets the safety criterion with the passage of a shunting tractor on combined wheels in the curved sections of track with radius 60 m.*
Conclusion. *For the complex design of a shunting tractor on combined wheels, the method is developed for determining the parameters of the elastic suspension of the guide rollers for the effective implementation of the traction and the stability of motion.*

Keywords: *rail and road motion, elastic suspension, elastic element, stability criterion.*

Сведения об авторе
А.С. Красулин
Телефон: +380 (97) 330-84-60
Эл. почта: krasulin-aleksandr@rambler.ru

Статья поступила 26.11.2016 г.
© А.С. Красулин, 2017
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин



УДК 628.336.6

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

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА БИОГАЗА ИЗ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ДЛЯ ЗАМЕНЫ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Рассмотрены различные способы получения биогаза из органических сельскохозяйственных материалов. Приведены наиболее часто используемые схемы реакторов для получения биогаза постоянного и периодического действия. Показаны распространенные способы очистки биогаза от H_2S и CO_2. Выделены наиболее эффективные способы очистки. Перечислены основные потребители и особенности использования биогаза в каждом конкретном случае. Приведен ориентировочный расчет требуемого количества газа и органического материала для отопления частного дома небольшой площади. Показаны варианты, при которых такой тип отопления целесообразен.

Ключевые слова: *биогаз, очистка газа, альтернативная энергетика, замена топлив.*

Постановка проблемы

С развитием технологий и ростом количества предприятий потребление энергетических ресурсов в промышленности возрастает с каждым годом. Вместе с этим возрастает также количество вредных выбросов. Для решения проблемы потребления природных ресурсов, а также улучшения экологической безопасности на планете возможны несколько вариантов:

– существенная модернизация устаревшего оборудования с целью снижения потребления топливных ресурсов;

– использование альтернативных и возобновляемых энергетических ресурсов;

– производство искусственных топлив из отходов экологически чистых предприятий.

Первый вариант важен для стран постсоветского пространства, где модернизация оборудования производится достаточно редко. В то же время данное мероприятие влечет за собой существенные капитальные затраты, что в масштабах даже достаточно прибыльных предприятий может занимать несколько лет и повысит себестоимость производимой продукции, тем самым снижая ее конкурентоспособность.

Второй вариант является привлекательным, однако существующие способы генерации энергии из возобновляемых источников производят недостаточное количество энергетических ресурсов для промышленности. Также встает вопрос себестоимости такой энергии. В настоящее время стоимость «зеленой» энергетики все еще находится на высоком уровне по сравнению со стоимостью энергии, получаемой от сжигания традиционных топлив.

В свою очередь, третий вариант обладает лучшими показателями себестоимости производимых энергетических топлив.

Поэтому необходимо проанализировать различные способы производства биогаза с целью дальнейшего использования его в энергетике.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время представляют интерес системы производства газового топлива из органических отходов сельскохозяйственных ферм [1]. Такой газ получил название биогаза. Процесс получения газа из различных биологических продуктов проходит несколько стадий: жиры и углеводы в результате жизнедеятельности бактерий переходят в гидролизные бактерии в период гидролизной фазы, при этом образуются аминокислоты, глюкоза и жирные кислоты. Следующая фаза – кислотообразующая, в которой образуются ферментные бактерии, такие как органические кислоты, спирты, альдегиды, водород, диоксид углерода, аммиак и сероводород. Третья фаза называется ацетогенной, в которой органические кислоты под действием ацетогенных бактерий преобразуются в уксусную кислоту, и последняя фаза – метаногинез. На последнем этапе уксусная кислота разлагается на метан, воду и углекислый газ, в свою очередь, водород и углекислый газ преобразуются в метан и воду [2,3]. Отсюда можно видеть, что получаемый биогаз состоит по большей части из природного газа и может быть использован в качестве его более дешевой альтернативы.

Известны и другие способы получения искусственных газов, такие как получение генераторных газов из угля. Однако в этом случае пе-

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

рерабатывается твердое энергетическое топливо, что не является экономически выгодным в сравнении с переработкой органического сырья, которое не используется в энергетике иным способом.

Цель (задачи) исследования

Цель работы заключается в анализе технологии производства биогаза и целесообразности его использования различными потребителями.

Основной материал исследования

Для получения биогаза существуют различные способы и установки. В основу их работы заложено выполнение следующих основных операций [4]:

– загрузка субстрата (заранее подготовленное сырье);

– поддержание требуемой температуры внутри установки;

– отвод газов;

– выгрузка отработанного вещества.

Для производства биогаза используется специально подготовленное сырье, зачастую представляющее собой отходы сельскохозяйственного производства, смешанные с водой (обычно 60 – 70% жидкости). Полученный субстрат размещают в яме либо специальном реакторе. Важным является поддержание требуемой температуры субстрата с целью обеспечения оптимальных условий для жизни бактерий. Рекомендуемые диапазоны температур составляют 35-40 °С. Процесс производства биогаза из смеси может занимать до двух недель. Это значит, что смесь в течение всего времени находится в реакторе и продвигается от начала технологической операции к этапу выгрузки сырья. Такой способ получения биогаза называется проточным. Для него характерны последовательная подача сырья, непрерывный и стабильный процесс выработки газа. Схема установки представлена на рис. 1.

Еще одним вариантом работы установки для получения биогаза может быть периодическая подача сырья в реактор, при которой необходимо загружать и выгружать отработавшее сырье за один раз целиком. Рабочая порция субстрата все время находится в реакторе, и дополнительно ничего не подгружается и не выгружается. В таком случае выход газа будет непостоянным, максимальный выход будет наблюдаться в середине процесса. К преимуществам периодической загрузки сырья можно отнести возможность загрузки твердых субстратов с достаточно высоким содержанием сухого вещества наряду с возможностью загрузки жидких субстратов. Схематичное изображение приведено на рис. 2.

На рисунке приведены две схемы, слева расположена установка в начальный момент времени, когда купол газгольдера находится в нижней «мертвой» точке, на правом рисунке купол газгольдера поднят на максимальную высоту, выступая в роли газгольдера для биогаза.

Как было сказано выше, для всех случаев важным является поддержание требуемой температуры. Для этого стенки реактора необходимо изолировать от внешней среды путем размещения его в специальных емкостях. Наиболее распространенным вариантом поддержания заданной температуры по всему реактору является размещение его в воде, которая подогревается электрическим нагревателем [5]. Такой способ позволит распределить теплоту по всей поверхности реактора, не концентрируя ее в одном месте, в случае использования только электрического нагревателя. Вместе с тем обе установки оборудованы специальным устройством для перемешивания субстрата – миксером.

Также известны другие способы получения биогаза. Так, например, известен метод полного смешивания субстрата внутри генератора [6]. Такой тип газогенераторов встречается зачастую в сельской местности. При такой подаче сырья поступающий субстрат полностью смешивается с уже реагирующим материалом, тем самым исключается необходимость в затравливании, и реактор может работать непосредственно после внесения субстрата.

Также известны другие способы получения биогаза. Так, например, известен метод пол-

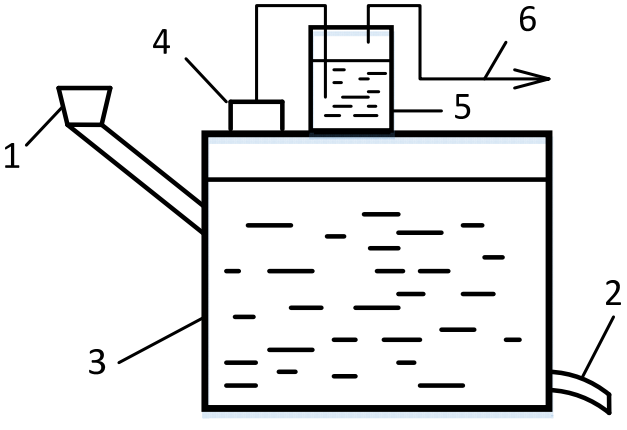


Рис. 1. Схема установки непрерывного получения биогаза:
1– устройство подачи сырья;
2 – выгрузка отработавшего материала;
3 – реактор для получения биогаза;
4 – клапан выпуска газа из реактора;
5 – гидрозатвор; *6* – подача газа потребителю

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

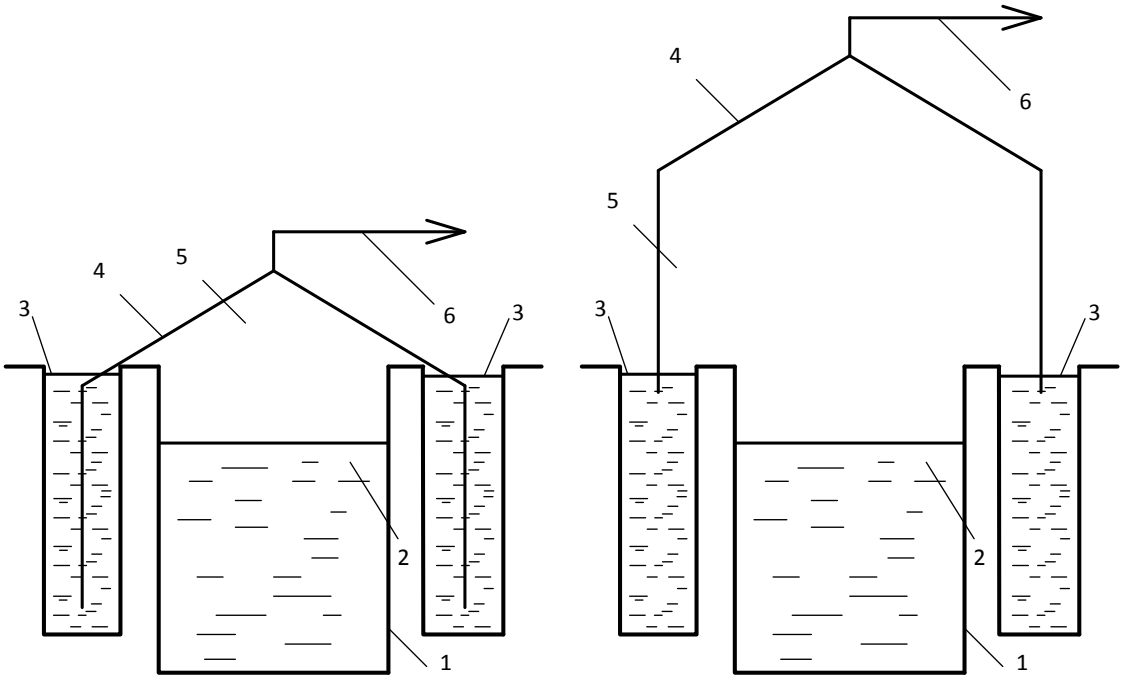


Рис. 2. Схема установки для получения биогаза с периодической загрузкой сырья:
1 – реактор биогаза; *2* – субстрат; *3* – вода (гидрозатвор); *4* – купол; *5* – биогаз;
6 – выдача газа потребителю

Табл. 1. Удельный выход биогаза с одной тонны различного органического материала

Субстрат	Выход биогаза, $м^3/т$
Навоз крупного рогатого скота (КРС)	60
Навоз свиней	65
Птичий помет	70-130
Силос кукурузный	200-300
Свежая трава	250-350
Молочная сыворотка	50
Зерно	500-600
Фруктовый жом	70
Свекольный жом	50-60
Меласса	430
Свекольная ботва	200
Барда зерновая	50-70
Барда мелассная	50
Пивная дробина	150-180
Жир	1300
Жир из жироловок	250
Отходы бойни	300
Корнеплодные овощи	100
Технический глицерин	500
Рыбные отходы	300

Табл. 2. Состав биогаза

Элемент	Процентное содержание, %
CH_4	50-75
CO_2	20-50
N_2	0-5

ного смешивания субстрата внутри генератора [6].

Такой тип газогенераторов встречается зачастую в сельской местности. При такой подаче сырья поступающий субстрат полностью смешивается с уже реагирующим материалом, тем самым исключается необходимость в затравливании, и реактор может работать непосредственно после внесения субстрата.

К преимуществам биогаза можно отнести возможность получения продукта практически из любого сырья. В табл. 1 приведены данные об удельном выходе биогаза с одной тонны различного органического материала.

Важно отметить состав получаемого газа. По большей части полученное топливо состоит из метана, что позволяет использовать его в различных теплотехнологических агрегатах. В табл. 2 приведен приблизительный состав биогаза.

При правильной работе реактора состав получаемого биогаза должен быть постоянным, в случае изменения состава газа необходимо обратить внимание на работу установки.

Как видно из состава топлива, такой газ можно использовать в качестве замены природному газу. Получаемый биогаз также содержит сероводород (H_2S). Несмотря на то, что доля H_2S находится на низком уровне, менее 1%, удаление данного компонента из газа необходимо, так как сероводород является агрессивным веществом, вызывающим коррозию. Поэтому перед исполь-

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

зованием биогаз необходимо очистить от сероводорода и, при необходимости, от двуокиси углерода. Это позволит повысить теплоту сгорания полученного газа.

Очистка биогаза включает несколько операций:

– удаление воды (разувлажнение);

– удаление серы (десульфурация);

– удаление двуокиси углерода и аммиака.

Для очистки полученного газа от двуокиси углерода могут применяться различные способы. Наиболее распространенные из них: очистка газа напором воды, мембранными процессами, адсорбцией с колебаниями давления, процессом Selexol и другими. При использовании растворов на основе воды и специальных химических соединений возможна одновременная очистка газа от H_2S и CO_2. Например, моноэтаноламин, являясь слабым основанием, обратимо взаимодействует с H_2S и CO_2 [7].

В случае использования мокрых способов очистки биогаза от двуокиси углерода полученный газ будет излишне влажным, что негативно сказывается на теплоте сгорания. Для ее увеличения необходимо удалить влагу одним из известных способов.

Для очистки газа от H_2S также возможно применение нескольких различных способов. Один из наиболее известных способов – подача воздуха в газовую зону ферментатора. При этом происходит окисление бактериями сероводорода и становится возможным удаление серы вместе с жидкостью из реактора. Авторами работы [8] разработан метод очистки, который основан на взаимодействии с оксидом железа. Преимуществом данного метода является практически полное удаление H_2S из потока биогаза независимо от его концентрации в исходном газе, а также полная инертность хемосорбента к основным компонентам биогаза (CH_4 и CO_2). Метод не требует больших капиталовложений, обеспечивает работоспособность в широком диапазоне давлений и позволяет удалять и другие сернистые соединения. Недостатком метода является периодичность работы модуля. Но наиболее эффективная очистка достигается с использованием активированного угля.

Само по себе отделение CO_2 является также экономически выгодным в случае дальнейшего использования либо продажи двуокиси углерода [7]. Область его применения широка: от «сухого льда» до сварки (в качестве инертной атмосферы) в пожарном деле и др.

Для крупных производств необходимо иметь высокие теплоты сгорания. При очистке биогаза только от серы и других вредных веществ теплота сгорания полученного газа может колебаться в диапазоне от 15 до 27 МДж/м^3, при содержании метана на уровне 55-85 %. По теплоте сгорания 1 м^3 биогаза эквивалентен 0,8 м^3 природного газа, 0,7 кг мазута, 0,6 кг бензина, 1,5 кг дров [9].

При производстве биогаза существуют достаточно простые способы регулирования и поддержания требуемой теплоты сгорания и давления. Для повышения давления газа при использовании эластичной крыши газгольдера возможно размещение на нем груза. При избыточном давлении газа необходимо включать в газовую магистраль дроссельные устройства.

Биогаз может использоваться в бытовом секторе, где наблюдается преимущественно невысокое потребление газа при его низком давлении. Типовыми потребителями газа могут выступать:

– отопительные установки жилых домов;

– водонагреватели;

– газовые и духовые плиты;

– газовые обогреватели;

– газопоршневые генераторы для выработки электроэнергии, насосы;

– автомобили (следует отметить обязательную перенастройку работы газобаллонного оборудования на такой тип газа).

Однако в каждом конкретном случае необходимо производить экономический расчет использования биогаза как альтернативного топлива. Для электрификации, а именно использования биогаза в качестве топлива в генераторах электрической энергии, в качестве нижней границы мощности агрегатов для рационального получения электроэнергии таким способом неоднократно называлась цифра 100 кВт [9]. Поэтому получение такой электроэнергии будет экономически обоснованным только для небольших поселков либо ферм, но не для частного использования.

Потребление биогаза в течение суток носит неравномерный характер, в то же время производство газа зачастую осуществляется с постоянным выходом газа. Для потребления всего произведенного продукта необходимо использовать газгольдеры, электрогенераторы и другие устройства, способные хранить либо использовать газ в то время, когда потребление находится на минимальном уровне. Газгольдер может быть выполнен в виде гибкой расширяемой емкости либо другой жесткой металлической емкости, но в этом случае необходимо предусмотреть систему заправки емкости с определенным избыточным давлением. Зачастую для хранения газа могут применять мокрые либо сухие газгольдеры

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

низкого давления, до 5 кПа. Также следует отметить, что при использовании газгольдеров и генераторов рекомендуется иметь дополнительный источник энергии, как электрической, так и топливной.

С теплотехнической точки зрения получаемый газ обладает достаточной энергетической ценностью для использования его в качестве топлива в нагревательных печах. Более подробные исследования теплофизических и энергетических свойств биогаза будут приведены в будущих работах.

К преимуществам биогаза можно отнести его октановое число, равное 100. Для сравнения: октановое число природного газа равно 135 единицам. Такой показатель позволяет использовать биогаз в двигателях внутреннего сгорания с высокой степенью сжатия.

Помимо основного продукта, биогаза, в процессе производства образуется побочный продукт компост, который является ценным для сельского хозяйства – его используют в качестве удобрения. В ряде случаев стоимость компоста превышает стоимость получаемого биогаза, что создает дополнительные положительные условия окупаемости биогазовой установки.

Несмотря на многие преимущества биогаза, при использовании данного топлива есть некоторые ограничения. Так, например, при использовании его в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания биогаз обязательно необходимо очищать от H_2S. Вместе с тем у биогаза достаточно низкие скорости распространения пламени. Данный факт накладывает некоторые ограничения на использование биогаза в промышленности, а также ставит специальные требования к газогорелочным устройствам. Во избежание срыва пламени необходимо уменьшать нагрузку на биогазовую горелку, снижать скорости истечения газа. Но даже при таких значениях скоростей большая часть горелок, работающих на природном газе, могут работать и с биогазом без модернизации.

Биогаз в исходном виде хранить в значительных объемах невозможно из-за дороговизны такого решения. Проблема состоит в том, что биогаз невозможно сжать до высоких давлений, характерных для хранения природного газа, без предварительной очистки до биометана. Углекислый газ, содержащийся в биогазе, не дает возможности сжать его до 200 атм. Так как при сжатии двуокись углерода переходит в твердую фазу и не позволяет производить компримирование. А при сжатии всего лишь до нескольких атмосфер объем, занимаемый биогазом, уменьшается незначительно. Как указано выше, заправка потребителей высоким давлением возможна только после очистки биогаза от двуокиси углерода, сероводорода и других примесей. Очистка биогаза от углекислого газа является достаточно сложным процессом. Химические методы очистки неприемлемы из-за потребности в большом количестве реагентов и большом выходе отходов реакции. А метод растворения углекислого газа в воде, применяемый промышленно, требует достаточно сложного и дорогого оборудования. Такое оборудование выпускается серийно, но для больших суточных объемов. Поэтому очистка биогаза и сжатие биометана – процедура, доступная только владельцам крупных биогазовых установок. Но и в этом случае биометан обычно не хранят длительное время, а регулярно используют для заправки автомобильного транспорта либо отправляют в общую газовую сеть. Общая газовая сеть в данном случае и служит накопителем, куда можно загонять газ летом и отбирать зимой. Такой способ хранения газа является экономически более выгодным, чем сооружение собственных газовых хранилищ.

Ниже приведен расчет требуемого количества газа и исходного органического вещества для отопления частного дома средней площади (70 м^2) с фермерским хозяйством крупного рогатого скота.

Для расчета мощности котла используется упрощенная формула:

$$P = \frac{SP_p}{10},$$

где P – мощность котла, кВт; S – площадь отапливаемого помещения, м^2; P_p – удельная мощность котла, кВт/м^2 (мощность на каждые 10 м^2).

Значение коэффициента P_p определяется исходя из температурных зон конкретного региона, для Донецкой области он равен 1,3-1,4 [10].

Значит, для частного дома мощность котла составит не менее:

$$P = \frac{70 \cdot 1{,}3}{10} = 9{,}1 \text{ кВт}.$$

Согласно представленным ранее данным, с одной тонны органических отходов крупного рогатого скота биогазовая установка позволит получить 60 м^3 биогаза со средней теплотой сгорания Q=25 МДж/м^3.

Тогда, для обеспечения непрерывной работы котла в зимний период времени необходимо производить следующее количество газа:

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

$$V_{газ} = \frac{N}{Q} = \frac{9{,}1 \cdot 10^3}{25 \cdot 10^6} = 0{,}000364 \text{ м}^3/\text{с} = 31{,}5 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Отсюда следует, что для работы данного котла при полной загрузке необходимо 31,5/60= =0,524 т=524 кг исходного сырья в сутки.

Из литературы известно, что одна корова дает 40-50 кг органических отходов в сутки. Можно сделать вывод, что для отопления небольшого частного дома площадью 70 м^2 потребуется хозяйство, состоящее минимум из 11-ти коров. Для крупных фермерских угодий такой способ отопления более рентабелен и целесообразен. Это также подтверждается в ряде литературных источников, в которых приведены сведения о целесообразности построения биогазовой установки для ферм с поголовьем не менее 300 дойных коров [11].

Выводы

В работе проанализированы существующие способы получения биогаза. Представлены схемы простейших биогазовых реакторов.

На основании проделанного анализа можно сделать вывод о том, что рассматриваемая технология позволяет получать по значительно более низким ценам энергоноситель, который по своей теплотворной способности не уступает природному газу (после очистки от двуокиси углерода).

Показаны возможные потребители производимого газа, преимущества и недостатки технологии.

Производство биогаза в малых объемах находит все больший спрос в сельском хозяйстве. При этом очистка газа от CO_2 не производится. Полученный газ используется в качестве топлива в отопительных системах. Для крупных хозяйств с большим суточным производством биогаза целесообразно проводить очистку от двуокиси углерода, тем самым повышая теплотворную способность полученного газа. Показано, что использование биогаза для электрификации целесообразно только при применении генераторов с мощностью не менее 100 кВт.

Такая технология может найти место на сельскохозяйственных и иных промышленных предприятиях в качестве источника альтернативной энергии.

Использование биогаза позволяет снизить использование предприятиями дорогостоящего природного газа путем его замены. Производство самого биогаза не влечет за собой постройку дорогостоящего и сложного оборудования. Побочный продукт биогазового производства – компост – также является ценным продуктом для сельского хозяйства и может быть продан в виде удобрения.

Однако из-за низкого удельного выхода биогаза количество перерабатываемого сырья велико, что определяет также большие объемы реакторов и площади, отводимые под них. В случае отопления объектов небольших частных хозяйств возникает вопрос о достаточности исходного сырья для производства биогаза.

Список литературы

1. Актуальные проблемы энергетики АПК / Под ред. А.В. Павлова. – Саратов: Саратовский ГАУ, 2013. – 378 с.
2. Yitayal, A.A. Enhancement and Optimization Mechanisms of Biogas Production for Rural Household Energy in Developing Countries // International Journal of Renewable Energy Development. – 2015. – Vol.4, Issue 3. – P. 189-196.
3. Saravanan, M. Experimental Study on Biogas Production in Batch Type Digester with Different Feed Stocks / M. Saravanan, K. Manikandan // International Journal of Research in Environmental Science and Technology. – 2012. – Issue 2. – P. 132-135.
4. Биоэнергетика: мировой опыт и прогнозы развития / Л.С. Орсик [и др.]. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 404 с.
5. Тихонравов, В.С. Ресурсосберегающие биотехнологии производства альтернативных видов топлива в животноводстве: Научно-аналитический обзор. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. – 52 с.
6. Scott Frazier, R. Biogas Utilization and Cleanup: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://articles.extension.org/pages/30312/biogas-utilization-and-cleanup
7. Методы повышения качества биогаза / В.Т. Джамулуев [и др.] // Вестник Чеченского государственного университета. – 2014. – №1, Ч.I. – С. 40-44.
8. Боровой, И.А. Разработка технологии очистки биогаза от сероводорода с помощью жидкого поглотителя в скрубберной схеме / И.А. Боровой, В.Г. Колобродов, Э.А. Винокуров // I Межд. конф. «Энергия из биомассы»: тез. доклада, 23-26 сентября, 2002. – Киев. – С. 185-187.
9. Некрасов, В.Г. Системы газоснабжения метаном на основе биогазовых установок // Газовая промышленность. – 1990. – №2. – С. 36-38.
10. Расчет мощности котла отопления: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.waterpark.com.ua/articles/otoplenie-gvs-vodosnabzhenie/raschet-moshchnosti-gazovogo-

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

kotla
11. Компания «ДИО экспорт» / Биогазовые установки для животноводческих комплексов: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.agrodio.com/state/AH:-1.200002242275

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

THE ANALYSIS OF TECHNOLOGY FOR BIOGAS PRODUCTION FROM ORGANIC WASTE TO REPLACE NATURAL GAS

Background. *In view of the high prices of energy resources, the search for alternative available energy sources remains an urgent task at present. One of such sources is an organic waste in agriculture. As known, it contains methane, which gradually evaporates into the atmosphere, thereby increasing "greenhouse effect". Rational and environmentally safe will be to extract the gas and use it as an energy feedstock for small power engineering.*
Materials and/or methods*. The analysis of known methods of biogas production from organic materials is presented in the paper. It is noted that in order to use the resulting gas in a particular industry it must be cleaned of sulfur and carbon dioxide with the aim of increasing the service life of fuel burning units and the calorific value of biogas. The authors of the paper propose to use the purified biogas as fuel for domestic boilers, stoves, and cars.*
Results. *As a result of calculations, it was found that 31.5 m^3 of biogas per day is needed for heating a 70 m^2 house. This amount of gas can be produced from organic waste of at least 11 units of cattle.*
Conclusion. *The proposed system of fuel production will allow partially (on small farms) or completely (in large farmland) to abandon the use of expensive natural gas in heating and hot water supply.*

Keywords: *biogas, gas cleaning, alternative energy, fuels replacement.*

Сведения об авторах

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

П.А. Гнитиёв
SPIN-код: 1943-4196
Scopus ID: 56916104300
ORCID ID: 0000-0001-9266-7969
Телефон: +380 (62) 301-08-65
Эл. почта: gnitiev.pavel@gmail.com

И.П. Дробышевская
SPIN-код: 5248-0588
ORCID ID: 0000-0003-3809-1393
Телефон: +380 (50) 473-90-64
Эл. почта: arinafizmet@yandex.ua

Статья поступила 30.03.2017 г.
© А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв, И.П. Дробышевская, 2017
Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров



НОВИНКИ ИЗД-ВА «ДОНЕЦКАЯ ПОЛИТЕХНИКА»

Стефаненко П.В. Основы педагогики высшей школы: учеб. пособие. – 2-е изд., доп. и перераб. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2016. – 180 с. ISBN 978-966-8348-73-3

Рассматриваются общие вопросы педагогики высшей школы (предмет и основные понятия педагогики, методы научно-педагогического исследования); основные задачи и особенности всестороннего воспитания обучающихся (содержание, принципы, формы и методы воспитания, особенности процесса воспитания); основы дидактики высшей школы (принципы дидактики, содержание образования, формы и методы обучения, контроль и учет знаний, умений и навыков обучающихся).

УДК 662.61

А.Б. Бирюков /д.т.н./, **В.А. Семергей**
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫГОРАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ТОПКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА

Предложена математическая модель выгорания полифракционного пылеугольного топлива в топке энергетического котла. Она базируется на рассмотрении системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих изменение размера частиц каждой из выделенных для рассмотрения фракций. При этом парциальное давление кислорода в каждый момент времени определяется на основании рассмотрения одновременного выгорания частиц всех фракций. При проведении численных экспериментов для типовых условий эксплуатации котла ТП-100, сжигающего антрацитовую пыль, показана достаточная для предварительного рассмотрения степень соответствия расчетных и практических данных о доле несгоревшего углерода и величине механического недожога. Доказано, что результат определения доли несгоревшего углерода существенно зависит от количества выделенных для рассмотрения фракций пыли. Также на основании анализа расчетных данных об изменении доли несгоревшего углерода и скорости выгорания углерода сделан вывод о целесообразности предварительной тепловой обработки пыли для уменьшения времени задержки воспламенения частиц в топке котла.

***Ключевые слова**: угольная пыль, энергетический котел, сжигание пылеугольного топлива, ситовый анализ, доля несгоревшего углерода, механический недожог.*

Постановка проблемы

Несмотря на успехи, достигнутые за последние десятилетия в области нетрадиционной энергетики, и довольно высокую долю атомной энергетики в мировой структуре выработки электроэнергии, теплоэнергетика в настоящее время и на ближайшую перспективу продолжает играть очень важную роль.

Традиционно основным источником энергии на теплоэлектростанциях является твердое топливо, а основной способ сжигания – факельное сжигание в топках энергетических котлов. Одной из статей потерь энергии при сжигании твердого топлива являются потери с механическим недожогом, связанные с тем, что не весь углерод коксового остатка частиц угольной пыли успевает полностью выгореть за время их пребывания в топочном пространстве. В настоящее время в среднем потери энергии с мехнедожогом при сжигании антрацитов и тощих углей в пылевидном состоянии составляют 1-6 %, и поэтому задача их сокращения продолжает быть актуальной.

Анализ последних исследований и публикаций

На практике для решения задачи сокращения механического недожога используются следующие технические решения: применение вихревых горелок и совершенствование их параметров, повышение реакционной способности топлива за счет предварительной тепловой обработки (например, при помощи плазматронов или других способов), увеличение тонины помола и т.д. [1].

Очевидно, что для достижения наилучших результатов технологические и конструктивные параметры должны в первом приближении корректироваться только на основании результатов предварительной расчетной проработки. Для рассмотрения такой сложной задачи, как выгорание факела твердого топлива при его сжигании в факеле, наиболее предпочтительным является использование метода математического моделирования.

Особой популярностью в настоящее время пользуются модели, создаваемые в специализированных вычислительных пакетах типа ANSYS. Имеется ряд готовых демонстрационных проектов, описывающих горение частиц пыли в топочном пространстве энергетических котлов [1,2]. Данные модели рассматривают одновременное протекание множества процессов (что, с одной стороны, хорошо), но это вызывает проблемы их адаптации и подтверждения адекватности.

Эти модели играют значительную роль в гносеологическом плане и могут быть нацелены

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

на поиск принципиально новых решений, однако для условий технических отделов теплоэлектростанций важно иметь инструмент в виде упрощенных быстродействующих, безусловно, устойчивых прогнозных математических моделей, позволяющих оперативно проверить влияние конструктивных и технологических параметров на качество выгорания топлива.

Достаточно простая модель выгорания угольной частицы в виде дифференциального уравнения 1-го порядка предложена в работе [3]. Для учета полифракционности факела в этой же работе получены упрощенные интегральные соотношения. Однако их недостатком является необходимость выбора и подстановки в расчетные выражения средних значений величин, характеризующих процесс, что может приводить к понижению точности расчетов.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является создание математической модели выгорания полифракционного факела, позволяющей одновременно учесть особенности выгорания каждой из фракций угольной пыли.

Основной материал исследования

Для решения поставленной цели математическая модель должна быть представлена *n*-ным количеством обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, где *n* – количество выделенных для рассмотрения фракций. Тогда разрабатываемая математическая модель запишется в следующем виде:

$$\frac{d\delta_1}{d\tau} = \frac{P}{RT}0{,}21\frac{2M_C}{\rho_{\hat{e}}}\frac{V_{\hat{e}}^0}{V_{\tilde{a}}}\times \times \frac{k_1}{1+\left(\frac{1}{Nu_{D1}}\right)\frac{k_1\cdot\delta_1}{D_1}}\left[(\alpha-1)\frac{V^0}{V_{\hat{e}}^0}+G\right]$$

$$\vdots$$

$$\frac{d\delta_i}{d\tau} = \frac{P}{RT}0{,}21\frac{2M_C}{\rho_{\hat{e}}}\frac{V_{\hat{e}}^0}{V_{\tilde{a}}}\times \times \frac{k_i}{1+\left(\frac{1}{Nu_{Di}}\right)\frac{k_i\cdot\delta_i}{D_i}}\left[(\alpha-1)\frac{V^0}{V_{\hat{e}}^0}+G\right]$$

$$\vdots$$

$$\frac{d\delta_n}{d\tau} = \frac{P}{RT}0{,}21\frac{2M_C}{\rho_{\hat{e}}}\cdot\frac{V_{\hat{e}}^0}{V_{\tilde{a}}}\times \times \frac{k_n}{1+\left(\frac{1}{Nu_{Dn}}\right)\frac{k_n\cdot\delta_n}{D_n}}\left[(\alpha-1)\frac{V^0}{V_{\hat{e}}^0}+G\right],$$

где P – давление в топочной камере, Па; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – текущее значение температуры поверхности частицы, К; $\rho_к$ – кажущаяся плотность угольной частицы без учета золы и летучих, кг/м^3; M_C – молярная масса углерода, кг/кмоль; V^0 – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг угля, нм^3/кг; $V_г$ – объем продуктов сгорания, образующихся при сгорании 1кг угля, нм^3/кг; $V_к^0$ – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг углерода (8,89 м^3/кг); k – константа скорости реакции окисления углерода, взятая при соответствующем значении температуры поверхности частицы топлива, м/с; Nu_D – диффузионное число Нуссельта; D – коэффициент диффузии кислорода в газообразной среде, окружающей частицу, м^2/с; G – текущая доля несгоревшего углерода коксового остатка.

Время пребывания частиц в топочном пространстве определено при помощи следующего выражения [3]:

$$\tau = \frac{V_m}{B\cdot V_г}\frac{273}{T_ф},$$

где V_m – объем топки котла, м^3; B – расход топлива на котел, кг/с; $T_ф$ – средняя температура факела, К.

Оценка времени пребывания топлива в топке для одной из типичных конструкций энергетических котлов в странах СНГ – ТП-100 – показала, что оно составляет порядка 3,3 с.

В качестве средней температуры факела выбрано значение 1820 К. Превышением температуры частицы над температурой факела для мелких частиц в первом приближении пренебрегаем. Значение константы скорости реакции горения углерода до углекислоты выбрано по опыту работы [3] для антрацита. Для температуры 1820 К оно составляет k=4,5 м/с.

Значение коэффициента диффузии кислорода в газообразной среде азота, углекислоты и водяных паров по опыту работы [3] принято на уровне $4{,}5\cdot10^{-4}$ м^2/с.

Текущая доля несгоревшего углерода коксового остатка частиц в каждый момент времени определяется как отношение массы углерода коксового остатка всех еще не сгоревших частиц к исходной массе углерода коксового остатка в момент начала его горения:

$$G = \frac{\rho_к\frac{\pi}{6}\sum_{i=1}^{n}\chi_i\delta_i^3}{G_н},$$

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

где $G_н$ – начальное значение массы углерода в 1 кг исходного топлива, кг; χ_i – число частиц топлива i-й фракции с размером δ_i, соответствующее 1 кг исходного топлива.

Численные эксперименты по исследованию выгорания полифракционной пыли проведены для условий котла ТП-100 одной из электростанций Донбасса.

Состав угля, поступающего на горелки котла, %: C^c=90; H^c=4; N^c=0,94; O^c=4; S^c=1,06; A^c=19; W^p=0,7.

Объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг угля заданного состава, и удельный выход продуктов сгорания в действительных условиях определены при помощи стандартных расчетных зависимостей, используемых в теории горения топлива [4]: V^0=7,367 м^3/кг, $V_г$ =9,069 м^3/кг.

В первом приближении для расчета использованы данные ситового анализа пыли от пробы, отобранной после мельницы из раздаточного бункера (табл. 1).

Для каждой из четырех выделенных для рассмотрения фракций размер частиц принят как среднее арифметическое минимального и максимального размеров согласно соответствующему классу крупности. Выбранные средние размеры частиц использованы для задания начальных условий для каждого из дифференциальных уравнений, входящих в составленную систему. Также с учетом среднего принятого размера частиц и исходной плотности угля определено число частиц топлива в каждой фракции, приходящееся на 1 кг угля.

В результате проведения численного эксперимента получены кривые, описывающие изменение расчетного для каждой фракции размера частиц топлива (рис. 1).

Остаточное содержание углерода после завершения процесса горения составляет 0,61 %, а механический недожог q_4=0,739 %.

Как видно из рис. 1, частицы 3-й и 4-й фракций успевают полностью выгореть в течение пребывания топлива в топке, а для 1-й и 2-й фракций углерод частиц не успевает полностью выгореть. При этом необходимо учесть, что массовая доля 1-й фракции составляет всего лишь 2,1 %, а для 2-й фракции она намного более существенна (11,9 %) и требует более глубокого рассмотрения.

Для иллюстрации влияния количества рассматриваемых классов крупности 2-я фракция условно разбита на три составляющие со средними размерами: 3-74 мкм, 4-95 мкм, 5-114 мкм и содержанием 4,4 и 3,9 %, что соответствует общей массовой доле частиц 2-й фракции – 11,9 %. Результаты моделирования выгорания топлива в этом случае представлены на рис. 2.

Табл. 1. Ситовый анализ пыли, отобранной из раздаточного бункера

№ п.п.	Класс крупности, мм	Массовая доля, %
1	0,16-0,125	2,1
2	0,125-0,063	11,9
3	0,063-0,040	10,4
4	0,040-0	75,6
Итого	-	100,0

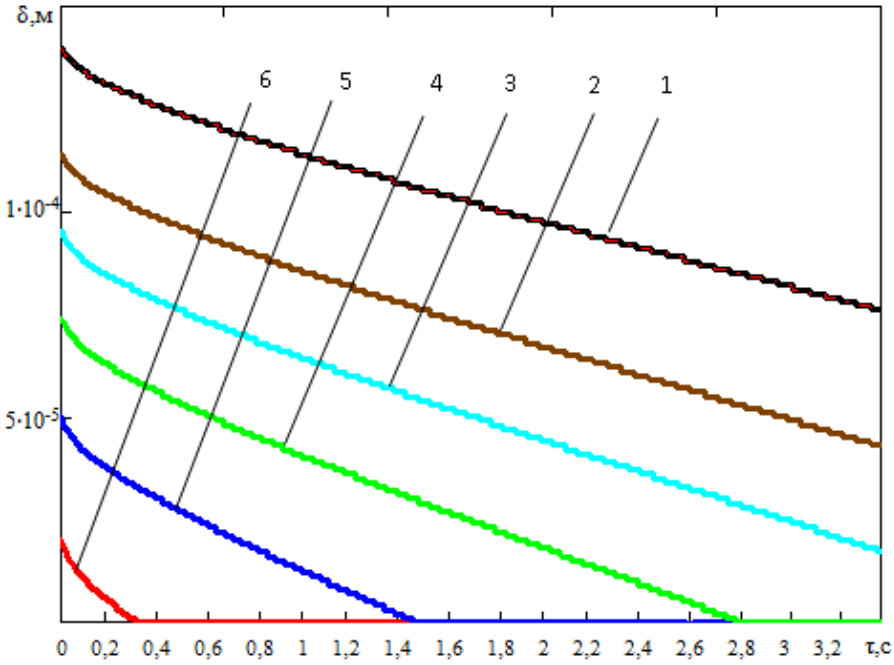


Рис. 1. Изменение размеров частиц выделенных для рассмотрения фракций в процессе сжигания ПУТ: *1* – исходный размер 140 мкм; *2* – 90 мкм; *3* – 50 мкм; *4* – 20 мкм

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

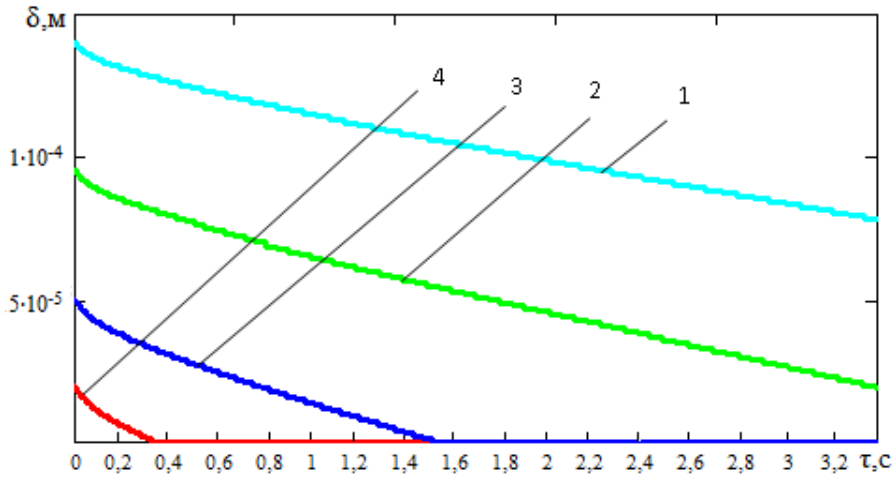


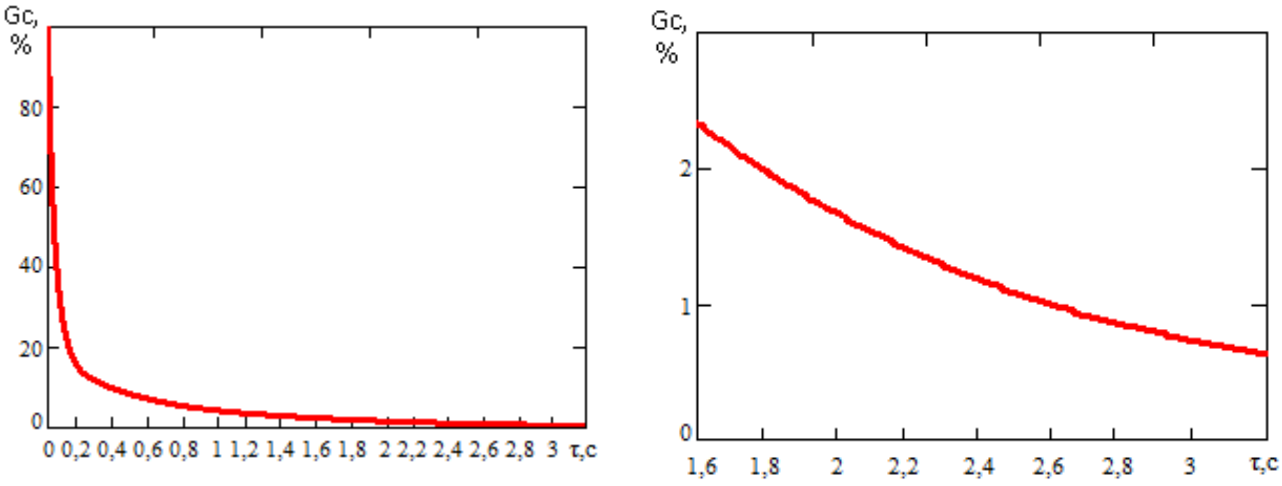
Рис. 2. Изменение размеров частиц при увеличенном количестве рассматриваемых фракций:
1 – исходный размер 140 мкм; *2* – 114 мкм; *3* – 95 мкм; *4* – 74 мкм; *5* – 50 мкм; *6* – 20 мкм

Остаточное содержание углерода после завершения процесса горения составляет 0,71 %, а механический недожог q_4=0,86 %.

Таким образом, расчетное значение результирующего недожога при прочих равных условиях зависит от того, какое количество фракций выбрано для рассмотрения. Необходимо отметить, что в большинстве случаев реальная величина механического недожога оказывается несколько выше. Причина этого заключается в том, что частицы после попадания в топку должны претерпеть ряд физико-химических трансформаций: выделение и воспламенение летучих, прогрев частиц коксового остатка до воспламенения углерода.

Для низкореакционных топлив влияние летучих на процесс воспламенения частиц коксового остатка достаточно незначительно. Таким образом, процесс горения частиц для каждой из рассматриваемых фракций, описываемый предложенной системой уравнений, начинается не с момента попадания частиц в топку, а через некоторое время задержки, которое уходит на прогрев и воспламенение частиц.

Естественно, для каждой из рассматриваемых фракций время задержки имеет свое значение: оно меньше для фракций меньшего размера и наоборот. По предварительным оценкам с использованием зависимостей для расчета нагрева термически тонких тел [5] и теории струйного движения, время задержки на нагрев наиболее крупных частиц до температуры воспламенения (порядка 800 °С) может составлять до 0,35 с. Учет времени задержки воспламенения частиц разных фракций позволит дополнительно повысить точность описания процесса выгорания частиц при помощи разработанной математической модели и упростить процесс ее адаптации



а б

Рис. 3. Изменение содержания несгоревшего углерода в общей массе ПУТ, поступившей на сжигание в течение пребывания топлива в топочном пространстве:
а – для полного периода времени нахождения топлива в топке;
б – для завершающего этапа нахождения топлива в топке

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

на предварительном этапе.

В качестве дополнительных приемов для адаптации модели к конкретным условиям могут быть использованы приемы начальной или оперативной подстройки за счет коррекции значений константы скорости реакции окисления углерода или диффузионного критерия Нуссельта.

Характер изменения остаточного содержания углерода во времени для второго численного эксперимента представлен на рис 3.

Как видно из рис. 3, скорость выгорания углерода максимальна в начальном периоде пребывания частиц в топке и затем убывает. Эта закономерность объясняется снижением парциального давления кислорода по ходу факела в связи с его расходованием на выгорание топлива. Тем не менее, из анализа информации на рис. 3б видно, что увеличение времени пребывания топлива в топке на 0,6 с позволило бы снизить недожог на 0,3 %.

Таким образом, способ снижения механического недожога, связанный с предварительной активацией низкореакционного топлива, может быть убедительно обоснован при помощи полученных в данной работе результатов математического моделирования. Действительно, в результате предварительной активации топлива существенно сокращается время задержки на его воспламенение, что позволяет увеличить расчетное время пребывания частиц в топке. Особенно важным этот результат является для частиц крупных фракций.

Выводы

Разработана математическая модель выгорания полифракционного пылеугольного топлива в факеле, позволяющая одновременно учесть особенности выгорания каждой из фракций угольной пыли, определяемые ее средним размером, зольностью. Предложенная модель базируется на системе обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих изменение размера частиц каждой из выделенных для рассмотрения фракций.

Доказано существенное влияние количества выделенных для рассмотрения фракций на величину установленного при помощи математической модели механического недожога. Так, при проведении численного моделирования разделение фракции классом крупности 0,125-0,063 на три более узкие фракции с равномерным распределением массы частиц внутри них привело к росту расчетного значения величины механического недожога на 11 %.

Обосновано влияние учета времени задержки воспламенения частиц каждой из фракций на уточнение результатов определения величины механического недожога. Эта закономерность совместно с установленным характером изменения во времени доли несгоревшего углерода дополнительно поясняет сущность положительных результатов, достигаемых при предварительной активации низкореакционного топлива.

Список литературы

1. Ranade, V.V. Computational Modeling of Pulverized Coal Fired Boilers / V.V. Ranade, D.F. Gupta. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 271 p.
2. Díez, L.I. Modelling of pulverized coal boilers: review and validation of on-line simulation techniques / L.I. Díez, C. Cortés, A. Campo // Applied Thermal Engineering. – 2005. – Vol.25, Issue 10. – P. 1516-1533.
3. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев [и др.]. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
4. Бирюков, А.Б. Сжигание и термическая переработка органических топлив / А.Б. Бирюков, И.П. Дробышевская, Ю.В. Рубан. – Донецк: Ноулидж, 2014. – 232 с.
5. Heat and mass transfer: Workbook for students of institutes and universities / S.I. Ginkul, V.V. Kravtsov, V.I. Sheludchenko, A.B. Birukov. – Donetsk: Nord-Press, 2006. – 291 p.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, V.A. Semergey
Donetsk National Technical University (Donetsk)

MATHEMATICAL MODEL FOR PULVERIZED COAL BURNOUT IN THE FURNACE OF THE POWER BOILER

Background. *For dealing with such challenges as the solid fuel burnout by its flaring the method of mathematical modeling is most preferred. On the basis of the model formulation, it is advisable to use a well-known recording of the differential equations of the 1st order describing the change of specific particles size. For taking into account the polyfractional feature of the flare, the simplified integral re-*

ISSN 2518-1645/2518-1653 (print/online). Интернет: vestnik.donntu.org

lations are usually used. Their disadvantage is the necessity of selecting and using average values of quantities characterizing the process. Therefore, the aim of this paper is to create a mathematical model for burnout of the pulverized coal polyfractional flare, which allows considering the burnout feature of each fraction of the coal dust.

Materials and/or methods. *To determine the auxiliary parameters (the time of presence of the particles in the furnace, the rate constant of the reaction of carbon combustion, the diffusion coefficient, etc.) the complete set of calculated dependencies is selected. The system of equations is solved numerically using the Runge-Kutta method. As a result of the numerical experiments for the given source data determined the nature of the change of particle size for each of the fractions and the contents change of residual carbon when the coal dust is in a furnace.*

Results*. When modeling the flare burnout of an anthracite dust presented by four fractions, mm: 0.16-0.125; 0.125-0.063; 0.063-0.04; 0.04-0, with the mass proportion of fractions, %: 2.1; 11.9; 10.4; 75.6 respectively, the residual carbon content after the combustion process is 0.61 %, and the mechanical underburning q_4=0.739 %. When splitting a fraction of 0.125-0.63 mm into three narrower fractions with the uniform weight distribution of the particles within them, the estimated value of underburning increased by 11 % and was on the residual carbon content of 0.71 %, and the overall magnitude of mechanical underburning of 0.86 %.*

Conclusion. *The effect of the number of considered fractions on the value of mechanical underburning has been proven. The influence of the delay time of ignition of the particles of each fraction on clarifying the magnitude of mechanical underburning is substantiated. This pattern, together with the established character of the changes over time in the share of non-burnt carbon explains the essence of the positive results achieved by pre-activation of a low reactivity fuel.*

Keywords: *coal dust, power boiler, pulverized coal burnout, sieve analysis, unburned carbon proportion, mechanical underburning.*

Сведения об авторах

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

В.А. Семергей
Телефон: +380 (66) 189-60-57
Эл. почта: semergey79@mail.ru

Статья поступила 31.03.2017 г.
© А.Б. Бирюков, В.А. Семергей, 2017
Рецензент д.х.н., проф. Л.Ф. Бутузова



НОВИНКИ ИЗД-ВА «ДОНЕЦКАЯ ПОЛИТЕХНИКА»

Кадровая политика и кадровый аудит: учеб. пос. / Е.А. Шумаева, О.А. Савельева. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2016. – 98 с. ISBN 978-966-8248-76-4

Рассмотрены теоретические вопросы формирования и реализации кадровой политики на государственном, региональном и организационном уровне, основные направления и технологии кадровой политики, актуальность использования и анализа кадрового потенциала в кадровой политике организации, теоретико-методологические основы проведения кадрового аудита.

Особое внимание уделено формированию определенных навыков стратегической работы с персоналом, определения задач, возможностей и ограничений кадрового аудита, установления его связи с кадровой политикой с целью повышения эффективности системы управления в целом.

УДК 681.51

С.А. Лукьянченко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В SMART GRID СИСТЕМАХ

Приведены основные преимущества построения и внедрения «умных» сетей и их функции. Рассмотрены основные проблемы управления системами с нетрадиционными источниками энергии.

Ключевые слова: *концепция Smart Grid, «умная» сеть, системы управления, возобновляемые источники энергии.*

Постановка проблемы

В настоящее время переход от классических электросетей к цифровым вызван рядом факторов. Важным вопросом является глобальное изменение климата. Кроме того, рост стоимости топлива и эффективность использования возобновляемых энергетических ресурсов способствуют развитию интеллектуальных сетей. Во всем мире для снятия данных сети широко используют цифровые, компьютерные и коммуникационные технологии и с каждым годом все больше их модернизируют для более экономного потребления энергии. Однако в сетях будущего статические потребители нежелательны, они должны быть активными, и, следовательно, подача энергии должна динамически переключаться между пользователями и локальными возобновляемыми источниками энергии.

Анализ последних публикаций и исследований

Реализация принципов Smart Grid с каждым годом затрагивает все больше стран – возникает острая необходимость решения проблем связанных с потерями в линиях электропередач, авариями электросетей, устареванием систем управления энергосетями. Все это привело к тому, что ученые начали вести активные разработки в области интеллектуальной электроэнергетики. Изучением данной области занимаются такие ученые, как Гопель О.С., Косьянов В.А., Виссарионов В.И., Николаев В.Г., Воропай Н.И., Стычинский З.А., Клейн С. и др. Проекты по развитию «умных сетей» появились в некоторых странах Европы, Китае, США, России.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является обзор основных преимуществ «умных» сетей перед классическими системами электропередач, а также недостатков подобных систем в области управления.

Основной материал исследования

В своей современной форме интеллектуальная сеть включает в себя техническую базу, систему управления и протоколы передачи от электрических источников энергии до потребителей. Интеллектуальная сеть также должна предоставлять информацию об энергии в режиме реального времени, чтобы экономически выгодно регулировать потребление. Концепция построения «умной» сети показана на рис. 1 [1].

В целом можно сказать, что основной целью «умных» сетей является обеспечение преимущества в шести ключевых областях.

Шесть основных преимуществ Smart Grid:

– надежность, благодаря которой возможно снизить стоимость перебоев и нарушений качества электроэнергии, помимо снижения вероятности возникновения и последствий распространенных отключений;

– экономия – снижение цен на электроэнергию по сравнению с классическими сетями, а также создание новых рабочих мест;

– эффективность – с интеграцией возобновляемых и альтернативных источников энергии становится возможным снизить стоимость производства, доставки и потребления электроэнергии;

– экологичность – глобальное изменение климата поощряет использование возобновляемых источников энергии в качестве энергетических ресурсов. Это позволит уменьшить выбросы по сравнению с энергетическими сетями общего пользования и повысить эффективность производства, доставки и потребления энергии;

– защита, которая достигается за счет снижения вероятности и последствий техногенных аварий и стихийных бедствий;

– безопасность за счет снижения рисков, присущих возбужденной электрической системе, а также снижения времени воздействия этих опасностей.

Концепция «умной» энергосистемы имеет

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

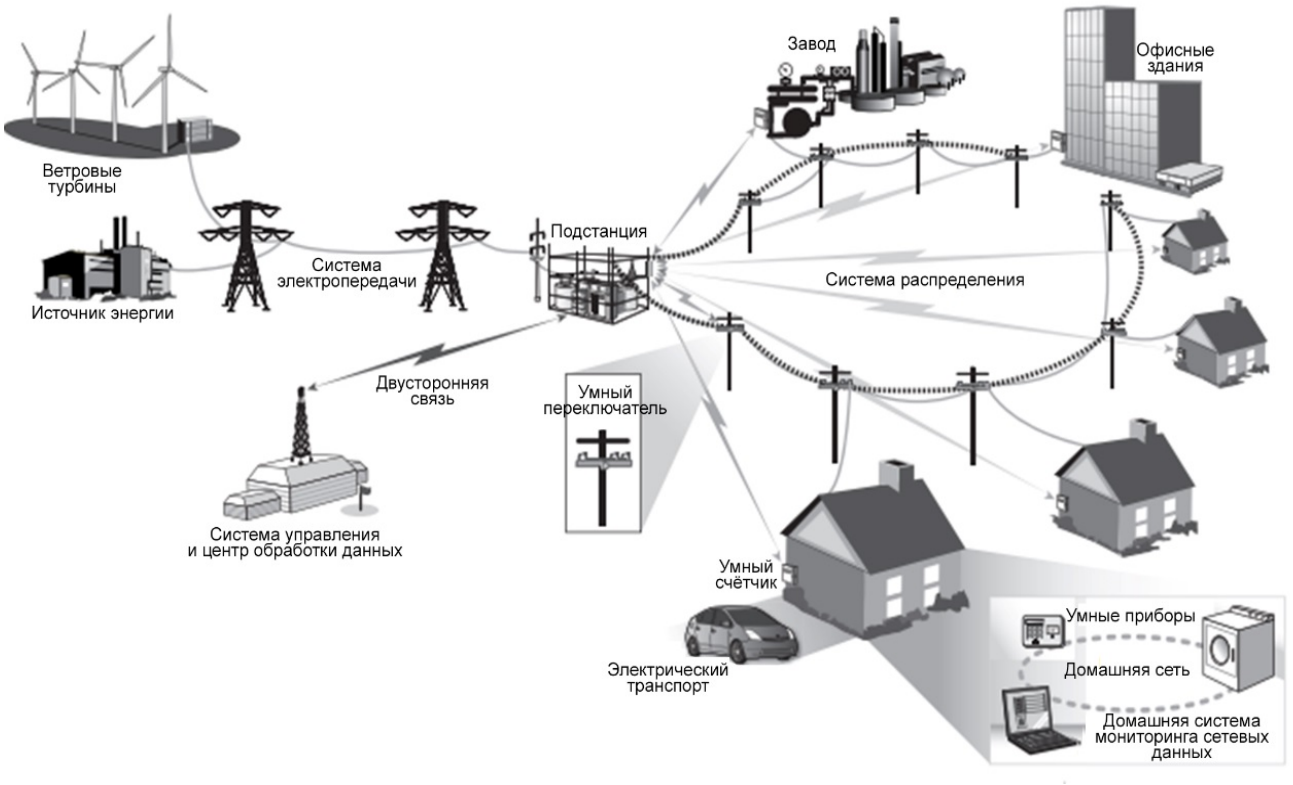


Рис. 1. Концепция «умной» сети

следующие цели:

– предоставление потребителям возможностей автоматизированного управления использованием электроэнергии и минимизации их затрат на оплату электроэнергии;

– самовосстановление системы в случае аварии;

– использование высококачественных энергетических ресурсов, включая возобновляемые;

– повышение качества электроэнергии и надежности электроснабжения. [3].

Интеллектуальная сеть должна иметь высокую эффективность, а для этого сочетать в себе несколько технологий, включая средства коммуникаций, силовой электроники и системы управления. Характеристики «умной» сети, подверженные внешним воздействиям, в совокупности с технологиями, необходимыми для построения интеллектуальных сетей, дают повод для проведения исследований в области связи, силовой электроники и систем управления, и могут рассматриваться для будущей исследовательской работы. В качестве примера, в последнее время большой интерес вызывает потенциал использования возобновляемых источников энергии в интеллектуальной сети в совокупности с высокоэффективными конвертерами и системами управления для повышения надежности и снижения выбросов углекислого газа с минимальными затратами.

Важным элементом в развитии интеллектуальных сетей является силовая электроника [4]. Энергия, которая вырабатывается такими источниками, как солнце, ветер, биомасса и водород, должна быть преобразована для подачи в сеть в такой вид, который удовлетворяет нормам и стандартам сети. Таким образом, возрастает необходимость в конвертерах энергии как в согласующих устройствах между возобновляемыми источниками энергии, накопителями энергии, бытовыми сетями и потребителями для регулирования мощности, энергосбережения и надежности системы. На рис. 2 показаны функции силовой электроники, применяемой в «умных» сетях.

Возобновляемые энергетические системы предлагают экономические и экологические преимущества в производстве энергии по сравнению с обычными системами на твердом топливе. Кроме того, использование возобновляемых источников энергии подразумевает наличие чистых и надежных источников энергии, которые могут быть использованы в сельской местности или других местах, расположенных далеко от электростанций. Основной результат в преобразовании энергии в электричество зависит от устройств силовой электроники и в значительной степени от конвертеров, потому что в основном нагрузка в сети является переменной. В настоящее время исследования проводятся именно для улучшения работы инверторов. Чтобы обеспечить преобразование энергии для сол-

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

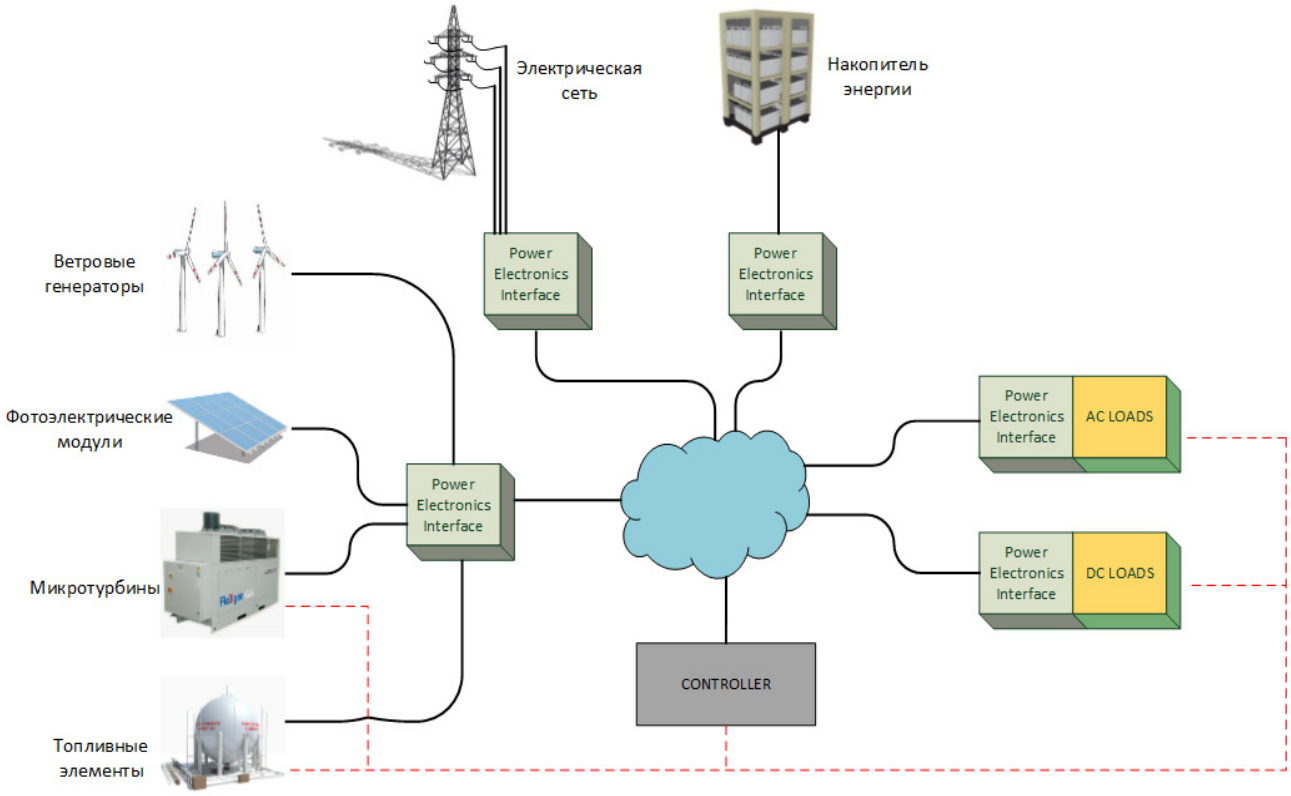


Рис. 2. Функции силовой электроники в Smart Grid

нечных установок, нужны инверторы различных топологий. Более того, инвертор как устройство требует настройки контроллера для управления переключениями с большей эффективностью. В целом, и инвертор и контроллер должны работать таким образом, чтобы выполнить требования по спросу и предложению [5].

При построении солнечных и ветровых систем особое внимание уделяется построению алгоритма отслеживания точки максимальной мощности. Например, ветровая турбина должна работать только в заданном диапазоне скоростей ветра, ограниченных скоростями включения (Vcut-in) и выключения (Vcut-out). При выходе за эти пределы турбина должна быть остановлена, чтобы не повредить и генератор, и турбину. Для работы при динамическом изменении скорости ветра ветроэнергетическая система нуждается в преобразовании изменяющейся нагрузки в постоянное напряжение, которое соответствует требованиям сети. Таким образом, большого внимания требует область умеренной скорости ветра, для которой необходимо разрабатывать алгоритм отслеживания точки максимальной мощности.

Поскольку генерирование энергии, основанное на солнечной и ветровой энергии, зависит от погодных условий, то вполне естественно, что они нуждаются в накопителе энергии, который используется в качестве резерва для поддержания требуемой мощности в сети. Кроме того, в период избытка энергию выгодно накапливать и направлять ее в сеть при низком уровне выработки энергии и высокой потребности. Эффективным и компактным способом хранения энергии является ее преобразование в топливо для накопления излишков энергии. Для достижения максимальной эффективности и контроля, как производства, так и потребления накопленной энергии необходимо использовать электронные преобразователи с возможностью двунаправленного обмена энергией. В качестве топливного элемента возможно использование водорода. Использование двунаправленного инвертора позволяет достигать максимально возможного коэффициента полезного действия и контролировать производство и потребление водорода. Также инвертор позволяет забирать активную энергию из сети, когда та производится в избытке, снабжая электролизер постоянного тока для получения водорода. В других работах по созданию накопителей энергии с помощью инверторов стремятся объединить ветровые, фотоэлектрические и топливные установки, чтобы максимизировать выходную энергию и уменьшить колебания выходной мощности для автономных станций. Затем предлагаемая гибридная система подключается к сети с помощью ШИМ-инвертора в качестве системы распределенной генерации, чтобы снять нагрузку на сеть и выступать в качестве непрерывного источника питания, когда сеть из нетрадиционных источни-

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

ков энергии отключена. Над гибридной системой выполняется управление для достижения точки максимальной мощности ветровой и фотоэлектрической систем, а также для обеспечения качества мощности электроэнергии, поданной в сеть от инвертора [6].

Инвертор является мощным электронным устройством, которое выполняет преобразование, поэтому ему необходим мощный регулятор. Многие типы контроллеров, от ПИ и ПИД до некоторых видов цифрового управления, можно изучить в актуальной литературе. Критическим параметром регуляторов инверторов является производительность, которая определяется по следующим критериям:

– выходное напряжение сигнала с низким уровнем гармонических искажений для линейных и нелинейных нагрузок;

– быстрый отклик на изменение нагрузки;

– незначительная статическая ошибка.

Возможно использование нечеткого управления с переменной структурой, приложенной к ШИМ-инвертору. Переменная структура управления представляет собой надежный метод управления для обработки нелинейных систем, в которых происходит изменение параметров и внешних помех. Для отслеживания точки максимальной мощности возможно применение нейронных сетей, которые применяются в моделировании и управлении системами возобновляемых источников энергии [2].

Выводы

В системах Smart Grid существует множество проблем, основными из которых являются проблемы информационной безопасности, проблемы внедрения и проблемы автоматического управления. Задачей систем автоматизации в системах Smart Grid является поддержание устойчивости системы при взаимосвязи различных возобновляемых источников энергии, а также управление данными источниками таким образом, чтобы удовлетворить запросы потребителей. Привлечение бытовых потребителей позволит управлять спросом, чтобы снизить пиковую нагрузку, тем самым снижая требуемую мощность и стоимость, а также повысить эффективность.

Следует отметить, что мощность, генерируемая ветроэлектростанциями (ВЭС), солнечными электростанциями (СЭС), когенерационными электростанциями (КгЭС) и другими альтернативными источниками энергии, не является постоянной величиной и зависит от природных условий – наличия ветра, активности солнечного излучения и т.д. В этом случае такая нестабильность генерации возобновляемыми источниками энергии вносит свои отрицательные коррективы в устойчивую работу энергосистемы. Классический принцип организации управления электроэнергетическими системами не подходит для электроэнергетических систем с большой долей возобновляемых источников энергии. Система Smart Grid подразумевает использование в процессе организации и управления новейших технологий и алгоритмов, таких как виртуальные электростанции (ВрЭС), FACTS-системы, фазоры, или PMU (Phasor Measurement Unit), вставки постоянного тока (HDVC), различного типа накопители энергии (в том числе и электромобили) и т. д. Построение систем связи, телекоммуникаций, систем управления и РЗиА базируется на основе использования протокола МЭК (IEC) 61850. В качестве базовых источников электроэнергии (базовые электростанции) предусматриваются классические конденсационные тепловые электростанции (ТЭС) и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) [4].

Подводя итог, выделим такие проблемы:

– работа возобновляемых источников энергии (ветер и солнце) обусловлена скорее погодными и климатическими условиями, нежели потребностями пользователей, что делает управление и распределение электроэнергии еще более сложным. Как следствие, затрагивается стабильность сетей в части напряжения и частоты;

– проблемы возникают и у тепловых электростанций, которые должны работать с максимально полной нагрузкой. Тем не менее, учитывая изменения спроса и выработки электроэнергии от солнца и ветра, станции должны регулировать производство энергии довольно часто. Это приводит к потерям производительности и износу оборудования.

Список литературы

1. Шилин, А.Н. Интеллектуальные электрические сети: проблемы и решения / А.Н. Шилин, А.А. Шилин // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. – Вып.3. –Волгоград: ВолгГТУ, 2011.– С. 84-88. (сер.: Процессы преобразования энергии и энергетические установки).
2. Isa, N.B.M. Smart Grid Technology: Communications, Power Electronics and Control System / N.B.M. Isa, T.C. Wei, A.H.M. Yatim // International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA), 5-7 October 2015, Bandung, Indonesia: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. – P.10-14.
3. Стычинский, З.А. Возобновляемые источники энергии: Теоретические основы, техноло-

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

гии, технические характеристики, экономика // З.А. Стычинский, Н.И. Воропай. – Магдебург: Otto-von-Guericke-Universitaat Magdeburg Docupoint GmbH, 2010. – 209 с.
4. Ткаченко, С.Н. Энергосистема будущего. Концепция Smart Grid. Специфика реализации на Украине / С.Н. Ткаченко // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – №1. – С. 68-73.
5. Linnenberg, T. Analysis of potential instabilities in agent-based Smart Grid control systems / T. Linnenberg, I. Wior, A. Fay // 39th IEEE An. Conf. of Industrial Electronics Society (IECON), 10-13 November 2013,Vienna, Austria: Helmut Schmidt Universitat, 2013. – P. 7422-7428.
6. Анисимов, С.А. Исследование и разработка архитектур перспективных вычислительных гридов и интеллектуальных энергосетей: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.13.01 / Сергей Анатольевич Анисимов. – Нижний Новгород, 2013. – 22 с.

S.A. Lukyanchenko
Donetsk National Technical University (Donetsk)

MANAGEMENT PROBLEMS IN SMART GRID SYSTEMS

Background. *The use of Smart Grid technology in power engineering allows significantly reducing and optimizing the cost of energy consumption. As it is known, the basic principle of the central power supply network has not changed for decades. It is significantly outdated and does not allow efficient use of electricity. The introduction of new technologies will bring the power industry to a new level. It will be possible to control energy consumption, store and rationally use of energy in industry and in household conditions.*
Materials and/or methods*. Smart Grid technology is still relatively new and has a number of disadvantages. The most topical are issues of automatic control in such systems with the use of alternative energy sources. The alternative energy sources have such positive aspects as inexhaustibility and ecological cleanliness. But because of them, there are major problems in obtaining electric power. This area is actively developing, so the solution to these problems is urgent.*
Results. *The main management problems in Smart Grid systems arise from the dynamic changes of external influences. For non-conventional energy sources, they are the constantly changing weather and climatic conditions which affect the stability of networks with regard to voltage and frequency. Such power surges can damage the equipment. The attention should also be paid to the intensity of power consumption. At different times of the day, the intensity also changes and there is a need to account for consumption depending on time.*
Conclusion. *To eliminate the management problems it is necessary to explore and modernize the automatic control system. Developments of foreign colleagues in this field are of high level, so a review of the foreign literature on this issue will help simplify this task. Especially actively developments are carried out in Europe, China, and India.*

Keywords: *Smart Grid, control systems, renewable energy sources.*

Сведения об авторе
С.А. Лукьянченко
Телефон: +380 (99) 767-59-65
Эл. почта: sergey_luk92@mail.ru

Статья поступила 01.07.2016 г.
© С.А. Лукьянченко, 2017
Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский

УДК 66.047.3.085.1:665.34

А.Н. Поперечный /д.т.н./, Н.А. Миронова
ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли им. М. Туган-Барановского» (Донецк)

КИНЕТИКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПЛОДОВЫХ КОСТОЧЕК ПРИ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКЕ В ВИБРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ

Приведены результаты исследований изменения температуры плодовых косточек в процессе инфракрасной сушки в виброкипящем слое при различной плотности теплового потока, а также влияния температуры нагрева исследуемого продукта на продолжительность сушки до равновесного влагосодержания. Установлено, что с повышением заданной температуры нагрева уменьшается время, соответствующее наибольшей скорости изменения относительной массы продукта. При этом обнаружено, что на время наибольшей скорости удаления влаги влияет не только температура, но и структура, и размер самого продукта. Полученные результаты могут быть использованы при выборе рационального режима сушки плодовых косточек и в качестве исходных данных для проектирования сушильного оборудования.

Ключевые слова: *плодовые косточки, инфракрасное излучение, сушка, кинетика температуры.*

Постановка проблемы

Развитие температурных полей в плодовых косточках определяется их структурой, формами связи влаги, закономерностями влагопереноса, а также режимами сушки. Ядра плодовых косточек являются термолабильным продуктом, не допускающим нагрев свыше определенной температуры. Поэтому температура косточек является определяющим фактором, от которого в значительной степени зависит интенсивность процесса сушки.

Во многом зависит от температуры и продолжительности термообработки и глубина биохимических процессов в ядрах плодовых косточек, происходящих при тепловом воздействии. Чем дольше продолжительность сушки и выше температура нагрева ядер, тем интенсивнее нежелательные биохимические процессы (окисление масла в ядрах, денатурация белков и т.д.), которые приводят к ухудшению технологических свойств ядер плодовых косточек и качества получаемого из них масла [1].

При сушке плодовых косточек инфракрасным излучением проницаемость лучистой энергии изменяет характер протекания процесса [2-9]: энергия излучения, проникая в глубину косточки, интенсифицирует перенос влаги из центральных слоев к ее поверхности, что приводит к значительному сокращению продолжительности сушки. За счет поглощения инфракрасных лучей происходит плавление липидов, частичное разрушение клеточной структуры ядра косточки, удерживающей липидные гранулы. Для исключения подгорания продукта при воздействии инфракрасного нагрева целесообразно проводить сушку импульсами в сочетании периодов «отдыха» и воздействия инфракрасных лучей. В этом случае использование вибрационных воздействий на слой продукта позволяет обеспечить интенсивное перемешивание и постоянное обновление частиц, которые находятся в поле инфракрасного излучения.

В связи с этим значительный интерес представляет исследование температурного поля плодовых косточек при инфракрасном нагреве в виброкипящем слое с целью определения рациональных режимов ведения процесса, приводящих к интенсификации их сушки.

Анализ последних исследований и публикаций

Проведенный анализ научных работ в области сушки плодовых косточек показывает, что исследование температурных режимов является одним из важнейших этапов для выявления рациональных параметров процесса сушки.

В работе [10] автор рекомендует на основании проведенных экспериментальных исследований порционно-циркуляционным способом проводить сушку плодовых косточек при максимальной температуре нагрева продукта 90-110 °С, опираясь на полученные значения кислотного числа, характеризующего качество масла в ядрах косточек, при условии правильной подготовки продукта и своевременного проведения процесса сушки, так как срок хранения плодовых косточек оказывает существенное влияние на изменение химических показателей продукта.

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

Рекомендуемые значения температуры нагрева [10] противоречат результатам проведенных исследований более поздней работы [11]. Согласно этим исследованиям, термообработку (сушку) ядер косточковых культур необходимо проводить при температурном режиме, обеспечивающем нагрев ядер не выше 70 ºС. Однако в работе [11] не уточняется продолжительность периода между удалением косточки из плода и проведением процесса сушки. Отметим, что срок хранения косточек после их извлечения из плода оказывает существенное влияние на значение кислотного числа масла ядер [10].

В работе [12] приведены результаты экспериментальных исследований процесса тепловой обработки лепестков ядер косточковых культур с использованием импульсного воздействия инфракрасного облучения, при этом температура материала достигала 80…85 °С. Однако в проведенных исследованиях не приводятся данные относительно влияния температурных режимов на качество полученного масла, содержащегося в ядрах плодовых косточек.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является исследование кинетики температуры в процессе сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое.

Основной материал исследования

Объектами исследований являлись косточки: абрикоса сорта «Ранний Марусича» (начальное влагосодержание 28,7-32,2 %), вишни сорта «Владимирская» (начальное влагосодержание 19,4-21,4 %) и черешни сорта «Наполеон» (начальное влагосодержание 25,5-27,3 %).

Проведение экспериментов было осуществлено на специальном экспериментальном стенде [8]. Для измерения температуры в различных частях плодовой косточки и в рабочей камере использовались хромель-копелевые термопары (диаметр шарика спая 0,6 мм), помещенные во фторопластовые трубочки и соединенные с регистрирующим прибором КСП-4.

Толщина засыпки плодовых косточек на рабочую поверхность составляла один слой продукта. При этом измеряли изменение температуры нескольких косточек-образцов. Для закрепления термопары в косточке-образце просверливали отверстия сверлом диаметром 0,9 мм в двух местах в передней части (оболочке) и в середине (ядре) косточки. Для изоляции термопары (кроме спая) и плотности ее вхождения в косточку использовали термоизоляционный лак.

Для изучения механизма тепломассопереноса между поверхностью материала и рабочей средой при сушке измерялась температура рабочей камеры в различных точках. Начальную и конечную влажность плодовых косточек и их составляющих (оболочки и ядра) определяли методом высушивания до постоянной массы в сушильном шкафу в соответствии с ГОСТ 15113.4-77 [8].

Рассмотрим кинетику изменения температуры в оболочке и ядре плодовых косточек в процессе сушки при различных значениях плотности теплового потока инфракрасного облучения.

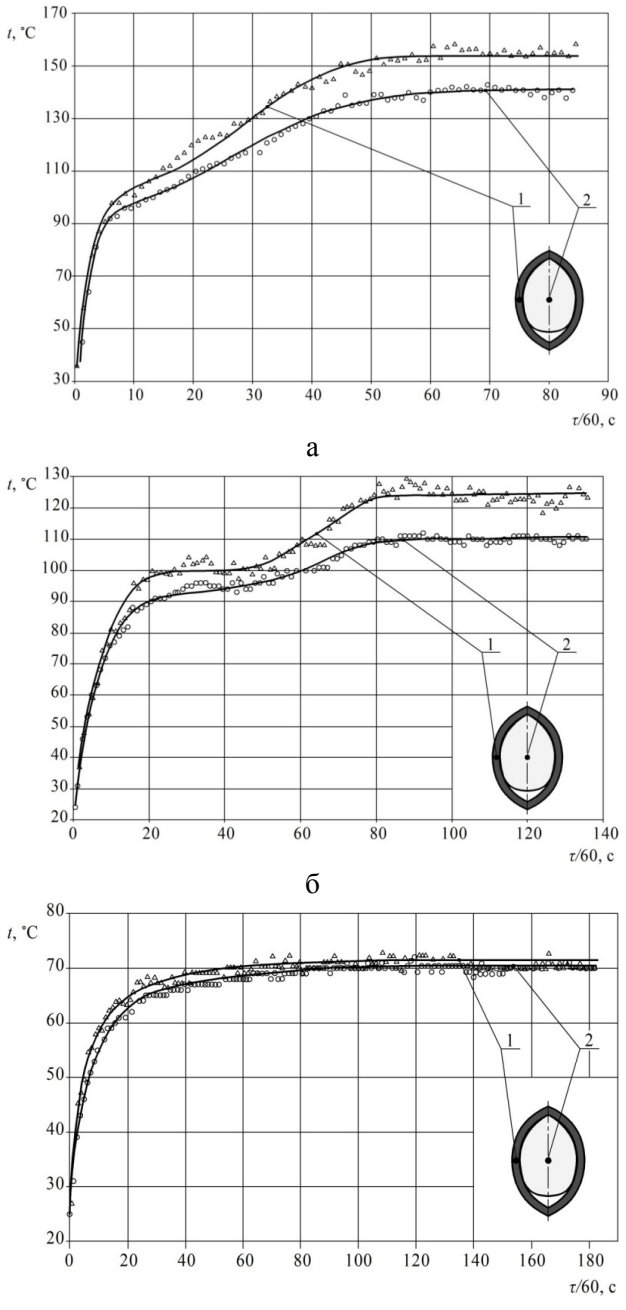


Рис. 1. Термограммы косточек абрикоса в зависимости от плотности теплового потока инфракрасного облучения: *а* – 1400 Вт/м^2; *б* – 900 Вт/м^2; *в* – 400 Вт/м^2

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

На рис. 1 приведены термограммы косточек абрикоса, соответствующие кривым сушки и скорости сушки [9].

Термограммы 1 соответствуют середине оболочки, термограммы 2 – центру ядра. Их анализ показывает, что в процессе сушки имеет место градиент температуры в середине косточек, причем он направлен от оболочки к ядру. Величина этого градиента увеличивается при повышении плотности теплового потока инфракрасного облучения. Так, при его значении 1400 Вт/м^2 в конце процесса температурный градиент достигает 13 ºС (рис. 1а), а при 400 Вт/м^2 – 1 ºС (рис. 1в). Величина плотности теплового потока влияет также и на форму термограмм. При значении 400 Вт/м^2 термограммы имеют два участка: крутой в начале процесса, которому соответствует интенсивное повышение температуры продукта, и плавный – соответствует практически неизменная до конца процесса температура продукта.

При других исследуемых значениях плотности теплового потока термограммы имеют более сложный характер: между крутым и плавным участками присутствует промежуточный участок, имеющий переменную крутизну. Этому участку соответствует в основном удаление связанной влаги продукта, поэтому ее появление вызвано, на наш взгляд, прогревом продукта до температуры около 100 °С, что значительно повышает долю бародиффузии в процессе миграции влаги.

Поскольку график изменения температуры во времени имеет вид кривой линии, количественно влияние температуры на качественные показатели можно оценить с помощью среднеинтегральной температуры [13,14]. Ее мы определяли по термограмме (площадь под термограммой делили на продолжительность сушки) в графическом редакторе КОМПАС, который имеет инструмент для автоматического определения площади фигуры, ограниченной криволинейным контуром.

На рис. 2 и 3 приведены графики изменения максимальной и среднеинтегральной температуры центра ядра плодовых косточек в зависимости от плотности теплового потока инфракрасного облучения. Характер всех графиков одинаков – они имеют форму кривых, выпуклых к оси температуры. Наибольшую крутизну имеют графики, полученные для косточек черешни, наименьшую – для косточек абрикоса.

Как видно из рис. 3, значения максимальной и среднеинтегральной температуры при 1400 Вт/м^2 превышают рекомендуемое для процесса сушки плодовых косточек значение в 110 ºС [10]. Это наглядно отражается на органолептических показателях: высушенные ядра косточек в середине имеют характерный темный цвет в первом случае и темно-кремовый во втором,

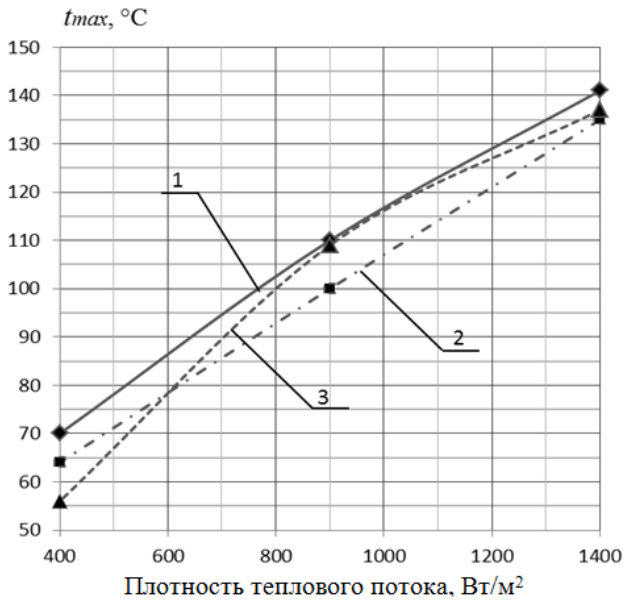


Рис. 2. Изменение максимальной температуры продукта в процессе сушки в зависимости от плотности теплового потока инфракрасного облучения:
1 – косточки абрикоса; *2* – косточки вишни; *3* – косточки черешни

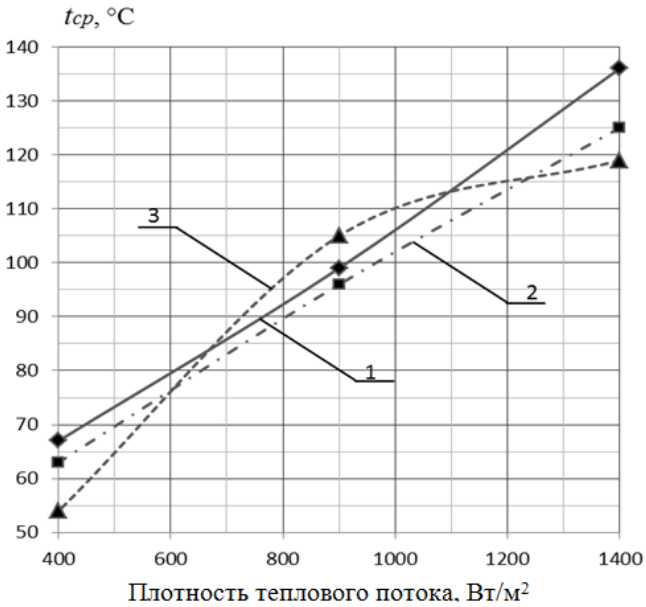


Рис. 3. Изменение среднеинтегральной температуры продукта в процессе сушки в зависимости от плотности теплового потока инфракрасного облучения:
1 – косточки абрикоса; *2* – косточки вишни; *3* – косточки черешни

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

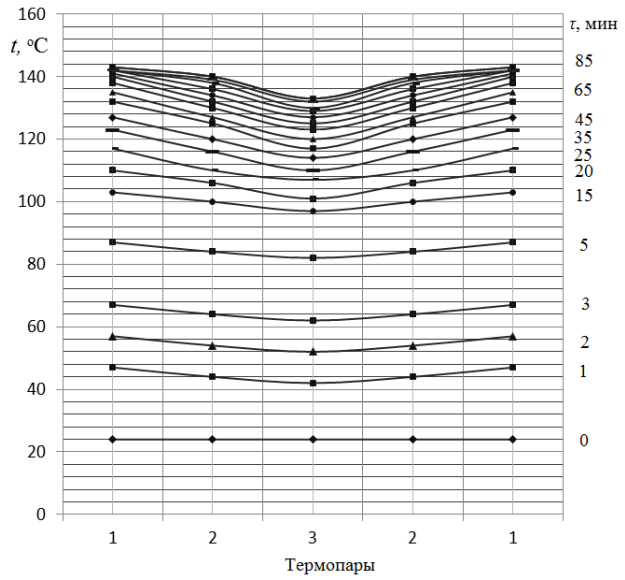


Рис. 4. Температурное поле в процессе сушки плодовых косточек абрикоса при плотности теплового потока 1400 Вт/м^2: *1* – оболочка; *2* – воздушная прослойка; *3* – ядро

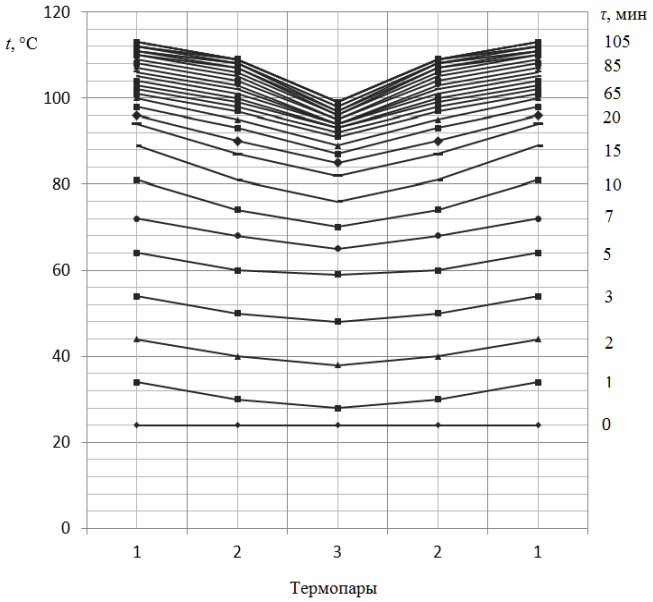


Рис. 5. Температурное поле в процессе сушки плодовых косточек абрикоса при плотности теплового потока 900 Вт/м^2: *1* – оболочка; *2* – воздушная прослойка; *3* – ядро

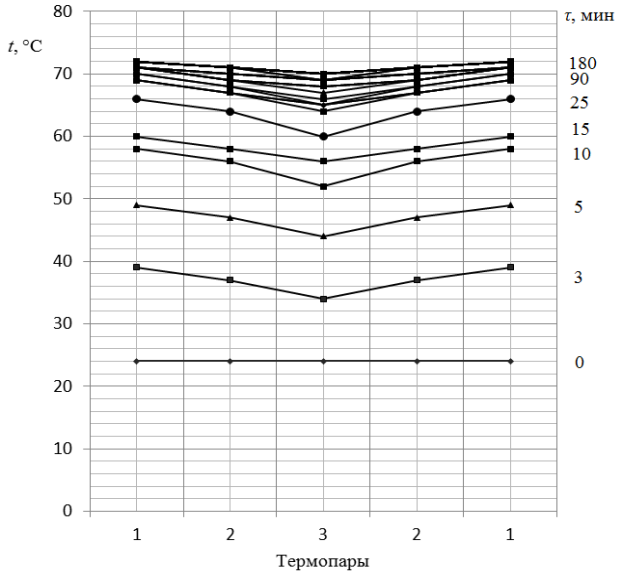


Рис. 6. Температурное поле в процессе сушки плодовых косточек абрикоса при плотности теплового потока 400 Вт/м^2: *1* – оболочка; *2* – воздушная прослойка; *3* – ядро

что свидетельствует о различной степени процессов меланоидинообразования.

Кинетика и динамика тепло- и массообмена сушки изучалась путем анализа температурных полей и полей влагосодержания.

Для оценки изменения температурного поля целой косточки при различных значениях плотности теплового потока нами построены графики, приведенные на рис. 4-6.

Анализ температурных полей показывает, что прогрев центральных и поверхностных слоев косточек идет с различной скоростью. Так, в течение первых трех минут поверхностный слой косточек прогревается со скоростью 14 °С/мин, центральный (ядро) – 10 °С/мин. Это объясняется проникновением инфракрасного излучения в косточку сразу на глубину около 1мм.

При прогреве косточек длительностью 60 мин получаем разницу между температурами поверхности и центра 4 °С.

Разница температур прогрева приводит к появлению температурного градиента, направленного от поверхностного слоя к центральному. Если в начальный период градиент равен 16 °С, то к концу процесса он уже составляет около 2 °С.

Влагосодержание центрального слоя (ядра) косточки практически изменяется мало, влага удаляется в основном из поверхностных слоев.

Выводы

Таким образом, были проведены исследования кинетики изменения температуры в процессе сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое. Выявлено, что процесс сушки целесообразно проводить при плотности теплового потока 400…900 Вт/м^2, при этом продолжительность сушки до равновесного влагосодержания для косточек абрикоса составит: при плотности теплового потока инфракрасного облучения 400 Вт/м^2 – 182 мин, а при 900 Вт/м^2 – 134 мин; для косточек черешни – 198 и 114 мин соответственно; для косточек вишни – 150 и 94 мин соответственно.

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

Список литературы

1. Щербаков, В.Г. Биохимия и товароведение масличного сырья.– М.: Агропромиздат, 1991. – 304 с.
2. Поперечний, А.М. Кінетика процесу сушіння плодових кісточок у віброкиплячому шарі ІЧ-випромінюванням / А.М. Поперечний, Н.О. Миронова // Науковий журнал Харківського державного університету харчування та торгівлі. – 2008. – Вип.7. – С. 93-10.
3. Поперечный, А.Н. Кинетика сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое / А.Н. Поперечный, Н.А. Миронова // Научный журнал НИУ ИТМО. – 2015. – №1.– С. 142-149. (сер.: процессы и аппараты пищевых производств).
4. Drying of Plant Materials in a Vibro-Fluidized Bed with Infrared Heating / A.N. Poperechnyi [et al.] // Academic message at the 4th edition of BIOATLAS International Conference, Transilvania University of Brasov, Faculty of Food and Tourism, May, 15-17, 2014. – P. 66-70.
5. Van't Land, C.M. Drying in the Process Industry. – John Wiley & Sons, 2011. – 368 p.
6. Sagar, V.R. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review / V.R. Sagar, P. Suresh Kumar // J Food Sci Technol. – 2010. – No.47(1). – P. 15-26.
7. Jongmin, C. Influence of the expansion device on the performance of a heat pump using R407C under a range of charging conditions / C. Jongmin, K. Yongchan // International Journal of Refrigeration. – 2004. – No.27. – P. 378-384.
8. Сушка нетрадиционного пищевого и лекарственного сырья: монография / А.Н. Поперечный [и др.]. – Краматорск: Каштан, 2016. – 250 с.
9. Влияние параметров сушки плодовых косточек на качество получаемого масла / А.Н. Поперечный [и др.] // Научный журнал НИУ ИТМО. – 2016. – №2. – С. 3-12. (сер.: процессы и аппараты пищевых производств).
10. Алейникова, А.В. Разработка метода и сушилки для сушки плодовых косточек: дис. … канд. техн. наук: 05.14.04 / Алейникова Алла Владиславовна. – Киев, 1988. – 134 с.
11. Гафуров, К.Х. Изменение биохимических свойств ядер плодовых косточек и качества масла при тепловой обработке / Техника и технология пищевых производств: тезисы докладов IX Межд. науч.-техн. конф., Могилев, 25-26 апреля 2013 г. – Могилев: Могилевский гос. ун-т продовольствия», 2013. – С. 84.
12. Шодиев, С.С. Интенсификация процесса тепловой обработки косточковых маслосодержащих материалов с использованием нетрадиционных методов подвода энергии: дис. … маг. техн. наук: 05.02.13 / Шодиев Сухроб Садиллоевич. – Бухара, 2010. – 81 с.
13. Жданов, І.В. Сушіння рослинної сировини у відцентровому псевдозрідженому шарі: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.18.12 / Жданов Іван В'ячеславович. – Донецьк, 2011. – 20 с.
14. Гришин, М.А. Интенсификация процесса сушки пищевых растительных материалов: автореф. дис. … докт. техн. наук: 05.18.12 / Гришин Михаил Александрович. – Одесса, 1973. – 58 с.

A.N. Poperechnyi /Dr. Sci. (Eng.)/, N.A. Myronova
Donetsk National University of Economics and Trade Named after Mykhayilo Tugan-Baranovsky (Donetsk)

THE KINETICS OF THE TEMPERATURE FIELDS OF FRUIT PITS WITH INFRARED DRYING IN VIBRATED FLUIDIZED BED

Background. *It is known that quality indicators of the dried products of plant origin depend on the temperature of their heating in the drying process, namely values of the final temperature and the process duration. It is to be noted that the temperature regimes of drying and the initial moisture content of the product determine to obtain the required values of the final moisture of the dried product, which, according to technical conditions of the reception of fruit pits by oil and fat companies, should be no more than 13 %. Drying fruit pits by infrared radiation in vibrated fluidized bed allows investigating the effect of different values of heat flux density on the temperature change. Since the schedule of temperature change in time has the form of a curve, determination of the average integral temperature and building of structure graphs of changes of the temperature field of fruit pits during the drying process can be used to quantify the effect of temperature on quality indicators.*

Materials and/or methods. *In the paper, the analysis of scientific research in the field of temperature regimes used during drying fruit pits and cores, allowing maintaining and improving the quality of the final product. Noted that to obtain a dried product with the necessary indicators, one of which is the final humidity of the material, the drying temperature not should exceed 110 °C. It is proposed to use*

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

the infrared heating and the vibrated fluidized bed for drying fruit pits that will allow evenly impulsive drying of the product and applying high-temperature infrared radiation.
Results. *The obtained curves of temperature change in the core and shell during the process of drying fruit pits by infrared radiation in vibrated fluidized bed, and average integral temperature and change of the temperature field lead to the conclusion that to preserve the quality of kernel oil of fruits the drying process should be carried out at the heat flux of 400-900 W/m^2; with these values the heating temperature of the kernel does not exceed 110 °C.*
Conclusion. *The obtained results can be used in the choice of rational mode of drying fruit pits by infrared radiation in vibrated fluidized bed, which provides even drying to obtain the desired quality indicators of the product and the initial data for the design of specialized drying equipment.*

Keywords: *fruit pits, infrared radiation drying, temperature kinetics.*

Сведения об авторах

А.Н. Поперечный
Телефон: +380 (66) 989-09-07
Эл. почта: obladn@kaf.donduet.edu.ua

Н.А. Миронова
SPIN-код: 5375-8228
Телефон: +380 (50)-876-38-08
Эл. почта: Mironova_nad@mail.ru

Статья поступила 22.03.2017 г.
© А.Н. Поперечный, Н.А. Миронова, 2017
Рецензент д.т.н., проф. А.Б. Бирюков

НОВИНКИ ИЗД-ВА «ДОНЕЦКАЯ ПОЛИТЕХНИКА»



Научно-методическое обеспечение дополнительного профессионального образования: монография / О.А. Захарова; научный редактор д.пед.н., проф. П.В. Стефаненко. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2016. – 302 с. ISBN 978-966-8248-80-1

Представлены результаты научных исследований, проведённых в рамках деятельности управления дистанционного обучения и повышения квалификации Донского государственного технического университета по обучению преподавателей вузов и персонала инновационных предприятий региона.

Рассмотрены теоретические и концептуальные принципы использования информационно-образовательной корпоративной среды в профессиональной подготовке и системе повышения квалификации.



Пономарев И.Ф. Экономический анализ состояния хозяйственной деятельности предприятий: учебник. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ». – 366 с. ISBN 978-966-2239-80-5

Раскрыты теоретические и практические аспекты экономического анализа в системе управления производством. Рассмотрены методы и приемы анализа состояния основных элементов производства: рабочей силы, основных оборотных средств, затрат на производство, эффективности финансово-экономических элементов. Финансовые и экономические элементы рассмотрены в соответствии с государственным образовательным стандартом и законодательной базой. Структура издания соответствует требованиям Болонского процесса относительно кредитно-модульной программы подготовки специалистов.

УДК 541.183:622.333

С.Л. Хилько /к.х.н./, М.И. Рогатко
ГУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко» (Донецк)

ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ

Методом потенциометрического титрования исследованы свойства гуминовых и гиматомелановых кислот из бурого угля. Количество карбоксильных и гидроксильных групп определено при титровании растворов солей гуминовых веществ раствором соляной кислоты измерением величины pH и окислительно-восстановительного потенциала. Количество гидроксильных групп в макромолекулах гиматомелановых кислот, которое может быть определено потенциометрическим методом, выше, чем в гуминовых кислотах. Общее содержание кислых групп (СООН и ОН) зависит от концентрации раствора и больше при низких концентрациях гуминового вещества.

Ключевые слова: *соли гуминовых кислот, соли гиматомелановых кислот, кислотно-основная реакция среды, окислительно-восстановительный потенциал, показатель редокс-потенциала, потенциометрия.*

Постановка проблемы

Гуминовые вещества (ГВ) являются наиболее устойчивой формой органических соединений углерода вне живых организмов. В настоящее время ГВ признаны одним из перспективных направлений «зеленой» химии в качестве возобновляемых, экономически выгодных и экологически безопасных источников сырья для получения химически важных продуктов, таких как поверхностно-активные и биологически активные вещества, сорбенты, редокс-полимеры, ингибиторы коррозии металлов, антиоксиданты, основа для получения лекарств, биологически активные добавки.

Интерес к гуминовым соединениям обусловлен их составом. В составе макромолекул гуминовых веществ содержится большое количество активных кислых групп – карбоксильных и гидроксильных, которые определяют их реакционную способность и физико-химические свойства. Поэтому надежное определение количества этих функциональных групп в структуре макромолекул является актуальной задачей. Важной характеристикой ГВ являются их потенциометрические характеристики, поскольку, используя способность к протонированию и депротонированию ГВ, возможно определение количества функциональных групп в структуре их макромолекул.

Анализ последних исследований и публикаций

Гуминовые и гиматомелановые кислоты считаются наиболее химически активными частями органогенного субстрата (уголь, торф, сапропель, горючие сланцы) [1,2], что делает их уникальными объектами для решения химически важных задач различного плана. Гиматомелановые кислоты по способу получения представляют собой спирторастворимую фракцию гуминовых кислот, которые, в свою очередь, являются растворимой в щелочах и нерастворимой в кислотах фракцией гумусовых веществ.

Высокая биологическая активность гуминовых веществ связана с их выраженным сродством к биологическим мембранам, участием в ионном транспорте, влиянием на активность ферментов [3-6]. В технических направлениях важными являются поверхностно-активные, комплексообразующие, окислительно-восстановительные свойства ГВ [7-10].

В литературе нет единства мнений относительно стандартной методики определения общей кислотности гуминовых кислот. Наиболее распространенным методом определения количества активных функциональных групп кислотного характера (карбоксильные и гидроксильные группы) признан метод кислотно-основного титрования, где также возможны различные варианты его осуществления [11 и цит. там лит.]. В одних случаях к водной суспензии твердого образца ГК добавляется раствор щелочи (гетерогенное титрование) [12]. В других работах [13] количество кислых групп определяют добавлением к раствору гумата натрия раствора кислоты (гомогенное титрование) заданной концентрации. Точку эквивалентности определяют титрованием до фиксированного значения pH [14].

При определении количества карбоксильных и гидроксильных групп в гуминовых кислотах

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

разными методами возможно получение несовпадающих результатов при титровании одного и того же образца. В работе [11] показано, что результаты кислотно-основного потенциометрического титрования и количество определяемых кислотных групп зависят от способа титрования (гомогенное или гетерогенное), концентрации гуминового вещества в растворе, времени установления равновесного значения pH титруемого раствора. Установлено, что титрование гомогенных систем (соль гуминовой кислоты + раствор HCl) является предпочтительным при исследовании кислотно-основных свойств гуминовых кислот.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является исследование гуминовых веществ из бурого угля методом гомогенного потенциометрического титрования растворов солей гуминовых и гиматомелановых кислот раствором соляной кислоты при измерении двух величин – кислотно-основной реакции среды (pH) и окислительно-восстановительного потенциала (E); на основании данных титрования двух видов – $pH=f(V_{HCl})$ и $E=f(V_{HCl})$ – сопоставление количества определяемых карбоксильных и гидроксильных групп в образцах гуминовых веществ.

Основной материал исследования

Гуминовые кислоты (ГК) получали из аналитической пробы бурого угля Александрийского месторождения (Украина) однократной экстракцией раствором NaOH (C_{NaOH} =0,1 н) при соотношении твердой и жидкой фаз 1:8 и температуре 20 и 100 °С. Затем из «сырого» экстракта получали нерастворимые в воде гуминовые кислоты осаждением 5 %-ным раствором HCl, который добавляли при постоянном перемешивании до pH 1-2. Выпавший осадок ГК отделяли от надосадочной жидкости центрифугированием. Осадок промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции среды (pH 6-7). Промытые гуминовые кислоты сушили в сушильном шкафу при t=80 °С до постоянной массы. Соли гуминовых кислот (гуматы натрия, ГН) получали растворением сухих гуминовых кислот в 0,1 н NaOH.

Натриевые соли гиматомелановых кислот (ГМН) выделяли этиловым спиртом из общей фракции сухих гуминовых кислот, которые были выделены при 100 °С. ГМК были экстрагированы из ГК при двух температурах – t_{ext}=20 и 80 °С.

При потенциометрическом титровании отбиралась аликвота 1 %-ного раствора соли гуминового вещества объемом 5 мл, к которой добавляли 20 мл 0,1 н NaOH и 20 мл дистиллированной воды. При этом объем титруемого раствора составлял 50 мл, а концентрация гумата натрия в титруемом растворе 0,1 %. Титрование проводили 0,1 н раствором HCl (V_{HCl}, мл) до pH=2,0 при 20 °С. Раствор 1 %-ного гумата натрия получали растворением навески сухих гуминовых кислот в 0,1 н растворе NaOH. После добавления каждой порции титранта систему перемешивали на магнитной мешалке в течение 3 мин. Аналогично было проведено титрование растворов NaOH без гуминового вещества, содержащих такое же количество щелочи, как и в растворах гумата на

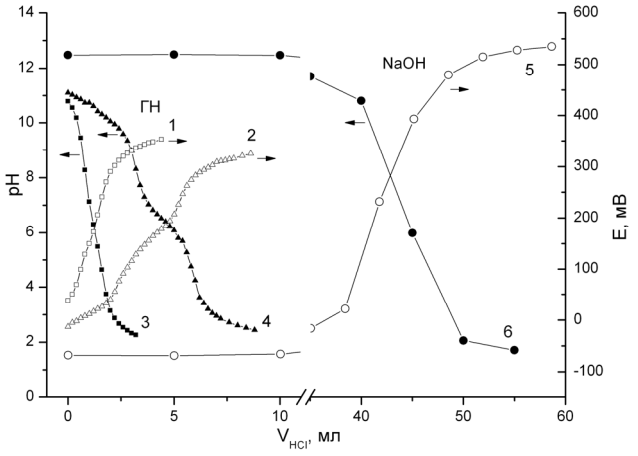


Рис. 1. Кривые потенциометрического титрования 0,05 %-ных растворов солей гуминовых кислот: $E=f(V_{HCl})$ (*1,2*), $pH=f(V_{HCl})$ (*3,4*), экстрагированных при двух температурах, и 0,1 н раствора NaOH (*5,6*), t_{ext}, °С: *1,3* – 20; *2,4* – 100

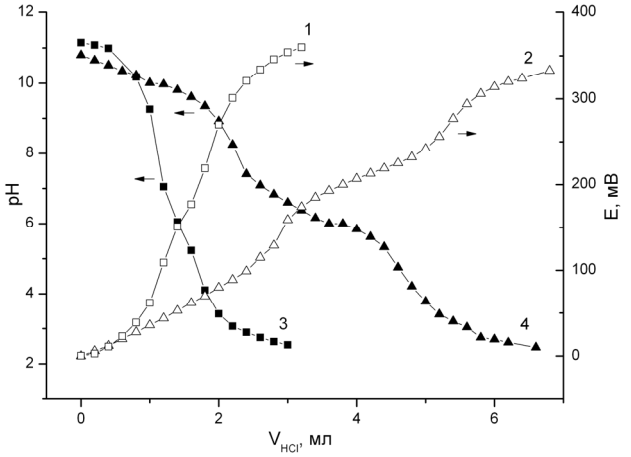


Рис. 2. Зависимости изменения величин окислительно-восстановительного потенциала, Е (*1*,*2*) и pH-среды (*3,4*) от объема кислоты при титровании солей ГМК, экстрагированных при двух температурах, t_{ext}, °С: *1*,*3* – 20; *2*,*4* – 80

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

Табл. 1. Содержание активных функциональных групп в образцах ГК и ГМК, рассчитанное из кривых титрования $E=f(V_{HCl})$ и $pH=f(V_{HCl})$

Температура экстракции, °С	$E=f(V_{HCl})$, мг-экв/г		$pH=f(V_{HCl})$, мг-экв/г	
	[–COOH]	[–OH]	[–COOH]	[–OH]
ГК				
20	3,2	2,2	3,2	2,0
100	4,0	2,4	3,8	2,6
ГМК				
20	2,4	4,8	2,4	5,0
80	4,8	2,4	5,0	2,0

Табл. 2. Содержание активных функциональных групп в образцах гумата натрия (t_{ext}=20 °С), рассчитанное из кривых титрования $i=f(V_{HCl})$ и $pH=f(V_{HCl})$

Концентрация гумата натрия, $C_{ГН}$, %	$E=f(V_{HCl})$, мг-экв/г		$pH=f(V_{HCl})$, мг-экв/г	
	[–COOH]	[–OH]	[–COOH]	[–OH]
0,05	3,6	2,8	3,6	3,0
0,10	2,4	2,2	2,4	2,4

трия (холостой опыт). Значение pH растворов измеряли на прецизионном pH-метре (Metrohm 744 pH Meter, Швейцария).

Величину окислительно-восстановительного потенциала (E, мВ) определяли на прецизионном мультиметре PCT-407 с использованием окислительно-восстановительного электрода PO50.

В работе измеряли pH и окислительно-восстановительный потенциал растворов натриевых солей гуминовых и гиматомелановых кислот при титровании их 0,1 н раствором HCl (V_{HCl}). Концентрация ГВ в растворах была 0,05 %. Точки эквивалентности определяли как максимумы на дифференциальных кривых:

$$\frac{\Delta pH}{\Delta V}=f\left(V_{HCl}\right) \text{ и } \frac{\Delta E}{\Delta V}=f\left(V_{HCl}\right). \qquad (1)$$

Из полученных экспериментальных зависимостей $pH=f(V_{HCl})$ и $i=f(V_{HCl})$ рассчитывали величины показателя редокс-потенциала (rH) по формуле, которая учитывает связь между величинами окислительно-восстановительного потенциала и кислотно-основной реакцией среды [15]:

$$rH=\frac{2FE}{2{,}303RT}+2pH\,, \qquad (2)$$

где F=96485 Кл/моль, постоянная Фарадея; R=8,31 Дж/(моль·К), универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура, К.

Как видно из рис. 1 и 2, для изученных фракций гуминовых веществ (ГН и ГМН) зависимости pH и E от V_{HCl} имеют антибатный характер: сни-

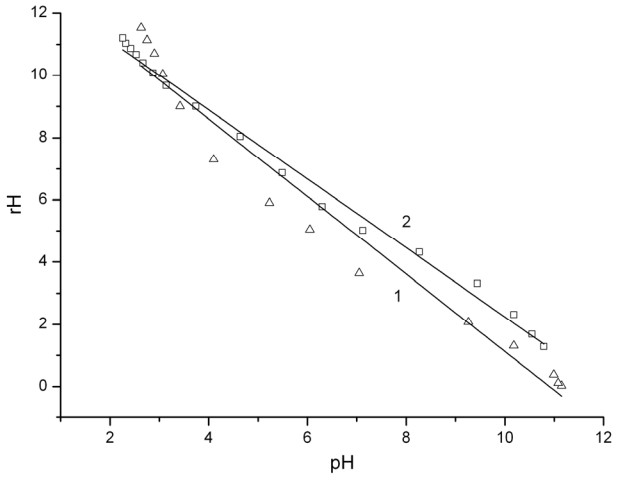


Рис. 3. Изменение величин rH от pH-среды при титровании ГМН (*1*), ГН (*2*), выделенных при t_{ext}=20 °С

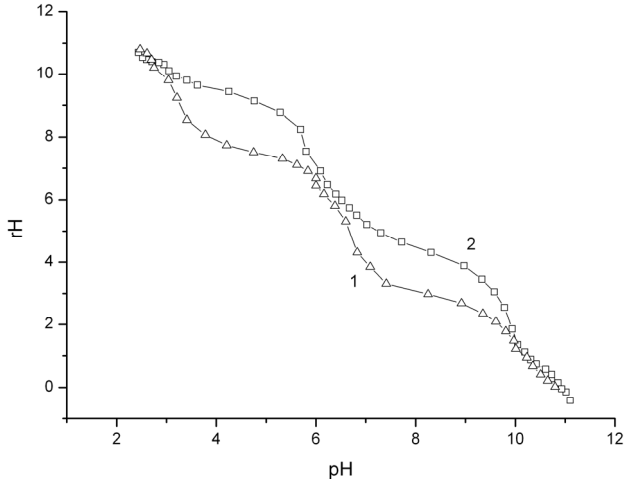


Рис. 4. Изменение величин rH от pH-среды при титровании солей гуминовых веществ, выделенных при температурах кипения растворителей: ГМК (*1*) (t_{ext}=80 °С) и ГН (*2*) (t_{ext}=100 °С)

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

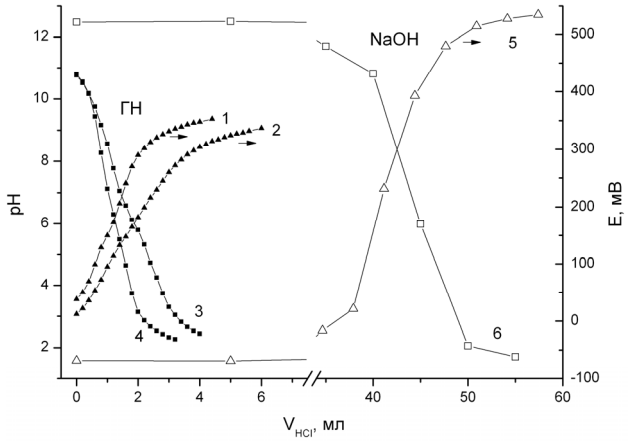


Рис. 5. Зависимости изменения величин окислительно-восстановительного потенциала, E, (*1*,*2*) и pH-среды (*3,4*) при титровании ГН и 0,1 н раствора NaOH (*5,6*) 0,1 н раствором HCl, $C_{ГН}$, %: *1* – 0,05; *2* – 0,1

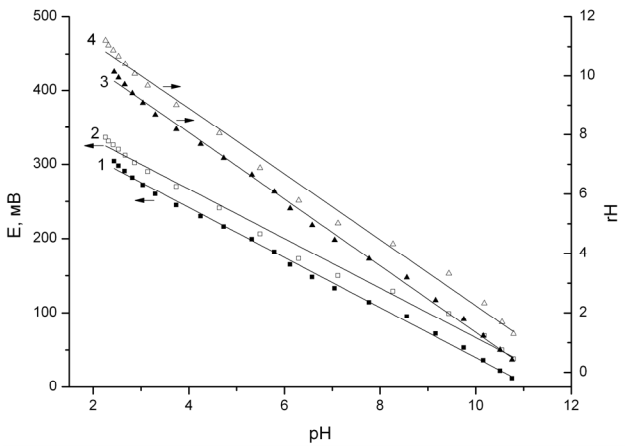


Рис. 6. Изменение величин E (*1,2*) и rH (*3,4*) от pH-среды при титровании солей гуминовых кислот 0,1 н раствором HCl, $C_{ГН}$, %: *1,3* – 0,05; *2,4* – 0,1

жение pH сопровождается ростом величины E.

В табл. 1 приведены рассчитанные из данных потенциометрического титрования (1) количества активных COOH- и OH-групп в структуре макромолекул гуминовых и гиматомелановых кислот, выделенных при разных температурах. Как видно, в образцах гиматомелановых кислот содержание OH-групп значительно выше, а COOH-групп ниже, чем в гуминовых кислотах. Полученные результаты подтверждают представления о том, что гиматомелановые кислоты являются наиболее восстановленной фракцией гуминовых кислот [16].

Зависимости rH от pH, рассчитанные по формуле (2) для солей гуминовых и гиматомелановых кислот, которые выделены при t_{ext}=20 °C, приведены на рис. 3. Зависимости имеют линейный характер, коэффициенты корреляции уравнений прямой: $R^2_{ГК}$ =0,9932; $R^2_{ГМК}$ =0,9743. Это указывает на однородность состава этих фракций гуминовых веществ [15].

Нелинейность подобных зависимостей для ГН и ГМН, которые выделены при температурах кипения растворителей (рис. 4), может быть связана с более выраженной неоднородностью их состава, то есть более широким распределением по молекулярным массам по сравнению с низкотемпературными образцами.

На рис. 5 приведены два типа кривых потенциометрического титрования для двух концентраций гумата натрия, экстрагированного при температуре 20 °C, а в табл. 2 – рассчитанное из этих кривых количество активных функциональных групп. Как следует из этих данных, количество активных, доступных для определения методом потенциометрического титрования функциональных групп в макромолекулах зависит от концентрации ГВ в растворе: при низких концентрациях гумата натрия количество определяемых COOH- и OH-групп выше.

Зависимость числа активных COOH- и OH-групп от концентрации солей гуминовых кислот может быть связана со способностью их макромолекул к ассоциации, которая приводит к образованию агрегатов макромолекул [17,18]. С ростом концентрации ГН в растворе увеличивается вероятность образования таких агрегатов. В результате агрегации часть функциональных групп оказывается экранирована фрагментами макромолекул и стерически недоступна для определения потенциометрическим методом.

Зависимости E и rH от pH (рис. 6) для растворов гумата натрия разных концентраций, выделенных при t_{ext}=20 °C, имеют линейный характер, что указывает на однородность состава солей гуминовых кислот разных концентраций в процессах потенциометрического титрования.

Выводы

1. Показано, что использование двух способов потенциометрического титрования позволяет надежно определять количество активных функциональных групп в структуре природных полимеров. Рассчитанные количества COOH- и OH-групп в макромолекулах гуминовых и гиматомелановых кислот, полученные путем обработки двух видов кривых титрования $pH=f(V_{HCl})$ и $E=f(V_{HCl})$, совпадают с удовлетворительной достоверностью, характерной для природных веществ.

2. Доказано, что гиматомелановые кислоты, являющиеся спирторастворимой фракцией гуминовых кислот, содержат гидроксильных групп больше, а карбоксильных групп меньше, чем

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

общая фракция гуминовых кислот. Это указывает на выраженные восстановительные свойства гиматомелановых кислот.

Список литературы

1. Кухаренко, Т.А. Окисленные в пластах бурые и каменные угли. – М.: Недра, 1972. – 215 с.
2. Глебова, Г.И. Гиматомелановые кислоты почв. – М.: МГУ, 1985. – 73 с.
3. Гостищева, М.В. Химико-фармакологическое исследование нативных гуминовых кислот торфов Томской области: автореф. … дис. канд. фарм. наук: 15.00.02; 14.00.25 / Гостищева Мария Владимировна. – Пермь, 2008. – 22 с.
4. Федько, И.В. К вопросу об использовании биологически активных гуминовых веществ в медицине / И.В. Федько, М.В. Гостищева, Р.Р. Исматова // Химия растительного сырья. – 2005. – №1. – С. 49-52.
5. Wershaw, R.L. Application of a membrane model to the sorptive interactions of humic substances // Environ Health Perspect. – 1989. – Vol.83. – P. 191-203.
6. Беркович, А.М. Применение гуминовых и гуминоподобных препаратов в ветеринарии и медицине: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.humipharm.ru/research/prim.pdf
7. Хилько, С.Л. Адсорбционные и реологические характеристики солей гуминовых кислот на границе раздела жидкость-газ / С.Л. Хилько, А.И. Ковтун, В.Б. Файнерман // Коллоидный журнал. – 2011. – №1, Т.73. – С. 97-107.
8. Szilagyi, M. Valence changes of metal ions in the interaction with humic acids // Fuel. – 1974. – Vol.53. – P. 26-30.
9. Interaction of radionuclides with natural and manmade materials using XAFS technique / S. Yu et al. // Sci. China Chem. – 2016. – P. 1-18.
10. Aristilde, L. Complexes of the antimicrobial ciprofloxacin with soil, peat, and aquatic humic substances / L. Aristilde, G. Sposito // Environmental Toxicology and Chemistry. – 2013. – Vol.32, No.7. – P. 1467-1478.
11. Хилько, С.Л. Особенности потенциометрического титрования солей гуминовых кислот / С.Л. Хилько, А.И. Ковтун, В.И. Рыбаченко // Химия твердого топлива. – 2011. – №5. – С. 50-62.
12. Вехов, В.А. Кажущиеся константы диссоциации активных групп гуминовых кислот Александрийского бурого угля / В.А. Вехов, Л.М. Кузнецова // Химия твердого топлива. – 1968. – №2. – С. 121-124.
13. Potentiometric determination of the total acidity of humic acids by constant-current coulometry / G. Palladino [et al.] // Anal. Chimica Acta. – 2007. – V. 582. – P. 164-173.
14. Piccolo, A. A comparison of two methods for the determination of total acidity of humic substances / A. Piccolo, L. Camici // Int. J. Environ. Anal. Chem. – 1990. – Vol. 41. – P. 65-69.
15. Морозов, И.В. Окислительно-восстановительные процессы / И.В. Морозов, А.И. Болталин, Е.В. Карпова. – М.: МГУ, 2003. – 79 с.
16. Орлов, Д.С. Гумусовые кислоты почв. – М.: МГУ, 1974. – 177 с.
17. Ghosh, K. Macromolecular structures of humic substances / K. Ghosh, M. Schnitzer // Soil Sci. – 1980. – Vol.129. – P. 266-276.
18. Characterisation of structure and aggregation processes of aquatic humic substances using small-angle scattering and X-ray microscopy / P. Pranzas et al. // Anal. Bioanal. Chem. – 2003. – Vol. 376. – P. 618-625.

S.L. Khil'ko /Cand.Sci. (Chem.)/, M.I. Rogatko
L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry

POTENTIOMETRIC STUDIES OF SOLUTIONS OF HUMIC ACIDS SALTS

Background. *Hymatomelanic and humic acids (humic substances, HS) are unique objects for producing chemically important products such as surfactants and biologically active compounds, sorbents, redox polymers, metal corrosion inhibitors, antioxidants, the basis for the production of medicines, biologically active additives. The macromolecules of humic substances contain a large number of active acidic groups – carboxyl and hydroxyl, which determine their reactivity and physical and chemical properties. Therefore, the reliable determination of the number of functional groups in the structure of macromolecules is an important task. The important feature of HS is their potentiometric characteristics because using the ability to protonation and deprotonation of HS, it is possible to determine the number of functional groups in the structure of their macromolecules.*

Materials and/or methods*. Humic acid was obtained from analytical samples of brown coal of Alexandria deposits by the standard method – extraction with a 0.1 N solution of alkali. Hymatomelanic*

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

acid was obtained from the total fraction of humic acids extracted from brown coal at a temperature of extraction 100°C by extraction with ethyl alcohol. Two methods of homogeneous potentiometric titration are used for the pH (precision pH-meter, Metrohm 744 pH Meter, Switzerland) and the redox potential measurements, E (multimeter PCT-407, redox electrode PO50). 0.05 % solutions of the sodium salt of humic and hymatomelanic acids were titrated with 0.1 N solutions of HCl. From the experimental dependencies pH=f(V_{HCl}) and E=f(V_{HCl}) the expected value of the redox potential indicator (rH) calculated, the dependency rH=f(pH) and the number of carboxyl and hydroxyl groups obtained.

***Results**. Based on the analysis of the dependencies rH=f(pH) shown that low-temperature fractions of humic and hymatomelanic acids are more homogeneous and stable during titration than high-temperature fractions of these compounds. From the data of differential titration curves, the quantity of the carboxyl and hydroxyl groups in the macromolecules of humic and hymatomelanic acids is calculated.*

***Conclusion**. It is shown that the use of two methods of potentiometric titration allows reliable determining the number of active functional groups in the structure of natural polymers. The calculated quantity of the carboxyl and hydroxyl groups in the macromolecules of humic and hymatomelanic acids coincide with satisfactory accuracy, typical for natural substances. It is proved that hymatomelanic acid, which is an alcohol-soluble fraction of humic acids, contains more hydroxyl groups and fewer carboxyl groups than the total fraction of humic acids. This indicates the pronounced reducing properties of hymatomelanic acids.*

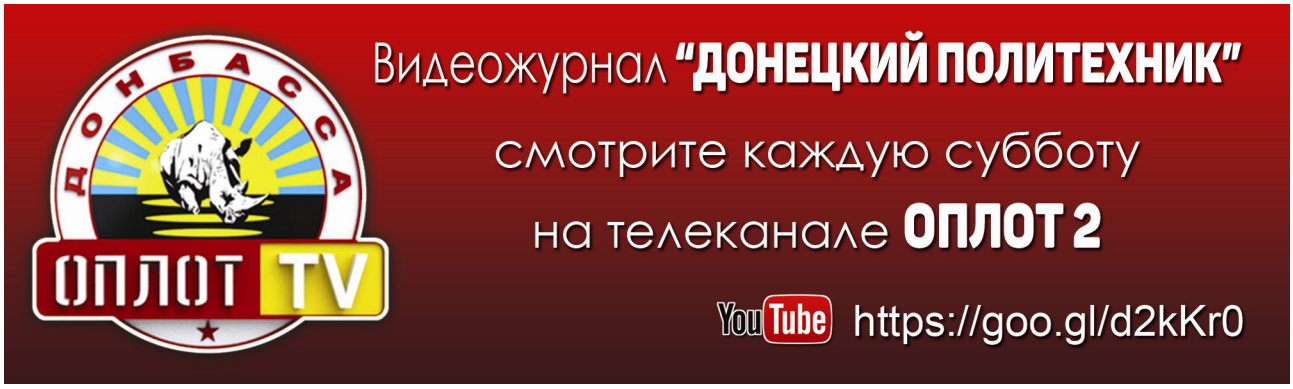
Keywords: *salts of humic acids, salts of hymatomelanic acids, acid-base medium reaction, redox potential, redox potential indicator, potentiometry.*

Сведения об авторах

С.Л. Хилько
Телефон: +380 (66) 75-79-462
Эл. адрес: sv-hilko@yandex.ru

М.И. Рогатко
Телефон: +380 (95) 619-17-71
Эл. адрес: marina.rogatko@gmail.com

Статья поступила 08.12.2016 г.
© С.Л. Хилько, М.И. Рогатко, 2017
Рецензент д.х.н., проф. Ю.Б. Высоцкий



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

УДК 541.183:622.333

С.Л. Хилько /к.х.н./, М.И. Рогатко
ГУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко» (Донецк)

ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЕ ТИТРОВАНИЕ СОЛЕЙ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ

Исследованы окислительно-восстановительные свойства гуминовых кислот из бурого угля. Проанализирована возможность определения гидроксильных групп в макромолекулах гуминовых кислот методом окислительно-восстановительного титрования растворами перманганата калия. Показано, что количество активных, доступных для определения потенциометрическим методом гидроксильных групп в макромолекулах гуминовых кислот зависит от концентрации $KMnO_4$.

Ключевые слова: *соли гуминовых кислот, перманганат калия, окислительно-восстановительное титрование, потенциометрия.*

Постановка проблемы

Гуминовые вещества (ГВ) образуются в природе в результате трансформации органических остатков и являются наиболее устойчивой формой органических соединений углерода вне живых организмов [1,2]. Гуминовые кислоты из разных природных источников могут существенно различаться по элементному составу, количеству функциональных ионогенных групп, степени конденсированности молекул, соотношению гидрофобных и гидрофильных фрагментов, молекулярной массе и др. [1-4]. Гуминовые соединения обладают целым рядом полезных свойств, прежде всего, ионообменных, сорбционных и поверхностно-активных. Наличие активных кислых групп (карбоксильных и гидроксильных) в макромолекулах гуминовых кислот обуславливает выраженную способность их к ионному обмену, комплексообразованию с ионами поливалентных металлов и ионными органическими соединениями, что позволяет использовать их в качестве сорбентов при очистке сточных вод и почв от тяжелых и радиоактивных металлов, нефтяных загрязнений и др. [5-8].

Анализ последних исследований и публикаций

Количество функциональных групп в структуре макромолекул гуминовых кислот (ГК) является одной из наиболее важных характеристик, которая определяет их физико-химические свойства. Известны различные методы определения функциональных групп в гуминовых веществах. Наиболее распространен метод кислотно-основного титрования [9].

Гуминовые кислоты относят к слабым полиэлектролитам. Количественное определение функциональных групп в макромолекулах гуминовых кислот осложнено тем, что кислотные группы ГК химически неидентичны, то есть имеет место химическая гетерогенность. Кроме того, это осложнено полиэлектролитными эффектами [10,11]. Полиэлектролитные эффекты вызваны тем, что диссоциация ионогенных групп в гуминовых кислотах происходит не независимо друг от друга. Диссоциация каждой последующей группы происходит в электрическом поле уже продиссоциировавших групп. В процессе титрования ГК в системе одновременно могут находиться диссоциированные и недиссоциированные кислотные группы (COOH-, OH-), что и является причиной химической гетерогенности функциональных групп каждого типа [12]. Поэтому количество доступных функциональных групп в макромолекулах гуминовых кислот, определенных различными методами нейтрализации, может существенно различаться.

Неточности при определении количества определяемых COOH- и OH-групп в растворах гуминовых кислот могут быть связаны со способностью их макромолекул к ассоциации [13]. Ассоциация гуминовых веществ в растворе может приводить к образованию агрегатов макромолекул, в результате чего часть функциональных групп оказывается экранирована фрагментами макромолекул и стерически недоступна для определения потенциометрическим методом. Кроме того, при кислотно-основном титровании солей гуминовых кислот растворами соляной кислоты происходит постепенный переход соли гуминовых кислот в Н-форму, которая является нерастворимой в воде в силу свертывания молекул в клубок (аналогично денатурации белковых молекул). Такое постепенное изменение конформации молекулы также приводит к экранированию части еще не оттитрованных COOH- и

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

ОН- групп, которые становятся недоступны для определения потенциометрическим методом. В силу этих причин общепринятый метод определения СООН- и ОН-групп в макромолекулах гуминовых веществ не дает полной информации о количестве кислых групп в этих природных полимерах.

Следует отметить, что определение количества карбоксильных групп методом кислотно-основного потенциометрического титрования, согласно имеющимся литературным данным, при заданных условиях титрования (концентрация ГК, pH среды, ионная сила раствора, время достижения равновесного значения pH) дает сопоставимые результаты [9]. При количественном определении гидроксильных групп этим методом выявлены недостатки, которые связаны с небольшими изменениями pH в щелочной области при титровании и поэтому неточным определением точки эквивалентности [9; 14]. Количество гидроксильных групп, рассчитанное из кривых кислотно-основного титрования, определяется с большой ошибкой. В этой связи поиск возможностей более точного определения количества ОН-групп в макромолекулах природных полимеров на основе гуминовых веществ является важным.

Из литературы известно, что в растительных экстрактах определяют общее количество фенольных гидроксильных групп методом окислительно-восстановительного титрования перманганатом калия [15; 16]. При этом возможно определение двух разных видов гидроксильных групп в экстрактах растений – гидролизуемых и конденсированных полифенольных соединений. В работе авторы попытались применить этот метод для определения количества гидроксильных групп в макромолекулах гуминовых кислот.

Можно было предположить, что определение ОН-групп в макромолекулах гуминовых кислот титрованием перманганатом калия позволит более точно определять количество ОН- групп. Окислительно-восстановительная система в растворе гуминовых веществ, создаваемая перманганатом калия, позволит определять как доступные, так и недоступные ОН-группы, поскольку такая система не предполагает изменения конформации макромолекул гуминовых соединений и создания условий экранирования части ОН-групп фрагментами этих макромолекул.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является отработка метода определения количества активных гидроксильных групп при окислительно-восстановительном титровании растворами перманганата калия применительно к гуминовым кислотам.

Основной материал исследования

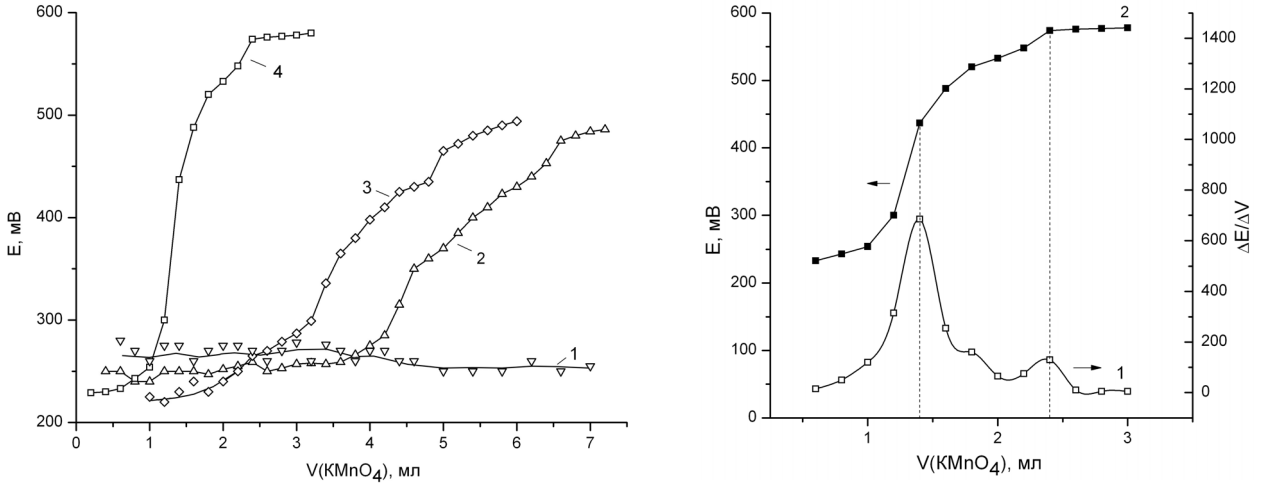
Гуминовые кислоты (ГК) получали из аналитической пробы бурого угля Александрийского месторождения однократной экстракцией раствором NaOH (C_{NaOH}=0,1 н) при соотношении твердой и жидкой фаз 1:8 и температуре 20 °С. Затем из «сырого» экстракта получали нерастворимые в воде гуминовые кислоты осаждением их 5 %-ным раствором HCl, который добавляли при постоянном перемешивании до pH=1-2. Выпавший осадок ГК отделяли от надосадочной жидкости центрифугированием. Осадок промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции среды (pH=6-7). Промытые гуминовые кислоты сушили в сушильном шкафу при t=80 °С до постоянной массы. Соли гуминовых кислот (гуматы натрия, ГН) получали растворением сухих гуминовых кислот в 0,1 н NaOH.

Величину окислительно-восстановительного потенциала (Е, мВ) определяли на прецизионном мультиметре РСТ-407 с использованием окислительно-восстановительного электрода РО50. Растворы перманганата калия готовили из стандарт-титров на дистиллированной воде.

На рис. 1 а приведены интегральные кривые потенциометрического титрования растворов гумата натрия перманганатом калия разных концентраций. Как видно из этого рисунка, титрование 0,02 н раствором $KMnO_4$ не выявляет зависимости $E=f(C_{KMnO_4})$. Увеличение концентрации $KMnO_4$ вызывает рост величины окислительно-восстановительного потенциала и указывает на протекание реакции окисления гидроксильных групп. На дифференциальных кривых титрования имеется два выраженных максимума (рис. 1б).

Это соответствует протеканию двух окислительно-восстановительных процессов, т.е. связано с окислением двух разных видов гидроксильных групп в макромолекулах гуминовых кислот. Количество активных гидроксильных групп в макромолекулах гуминовых кислот при титровании их 0,05%-ных растворов растворами $KMnO_4$ разных концентраций приведено в таблице 1. Содержание ОН-групп рассчитано как суммарное количество двух разных видов гидроксильных групп по двум максимумам на дифференциальных кривых. Как следует из данных этой таблицы, рост концентрации $KMnO_4$ приводит к увеличению определяемых активных гидроксильных групп в макромолекулах гуминовых кислот как на каждом из двух максимумах, так и их суммарного количества. При этом

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



а *б*

Рис. 1. Потенциометрические кривые (*а*) титрования 0,05 %-ного раствора гумата натрия растворами перманганата калия (V_{KMnO_4}) разных концентраций**,** интегральная и дифференциальная кривые (*б*) титрования 0,05 %-ного раствора гумата натрия 0,1 н раствором $KMnO_4$, C_{KMnO_4}, г-экв/л: *1* – 0,02; *2* – 0,05; *3* – 0,1; *4* – 0,2

рост концентрации $KMnO_4$ от 0,1 до 0,2 г-экв/л не приводит к увеличению количества определяемых ОН-групп. Отсюда следует, что для определения гидроксильных групп в ГК методом окислительно-восстановительного титрования необходимая и достаточная минимальная концентрация раствора перманганата калия составляет величину ≈0,1 г-экв/л.

Было проведено измерение окислительно-восстановительного потенциала во времени при добавлении различных количеств $KMnO_4$ к 0,05 %-ному раствору солей гуминовых кислот при непрерывном перемешивании раствора и рассчитаны кинетические характеристики процесса. Как следует из рис. 2, величина окислительно-восстановительного потенциала резко падает в начальный период времени (10-20 мин), а затем выходит на равновесный участок, который практически не зависит от времени. Общая скорость процесса окисления рассчитана как тангенс угла наклона начальных линейных участков кривых зависимости $E=f(t)$. Общее уравнение для скорости процесса окисления макромолекул ГН перманганатом калия можно представить в виде:

$$\frac{dE}{dt} = k(E_{\text{равн}} - E_{10}),$$

где $E_{равн}$ – равновесное значение окислительно-восстановительного потенциала при данных условиях; E_{10} – значение окислительно-восстановительного потенциала через 10 минут протекания процесса, k – константа уравнения.

Как видно из табл. 2, общая скорость процесса окисления солей гуминовых кислот возрастает с увеличением концентрации $KMnO_4$, а величина константы уравнения уменьшается. Поскольку окисляемый субстрат является природным полимером с химически неидентичными функциональными группами, а в водных растворах гуминовых кислот возможна ассоциация, то изменение кинетических характеристик процесса может быть связано со способностью молекул

Табл. 1. Количество активных гидроксильных групп в макромолекулах гуминовых кислот при титровании их 0,05 %-ного раствора растворами $KMnO_4$ разных концентраций при pH=7,5. Перемешивание реакционной смеси в течение 10 мин

[OH], мг-экв/г	Концентрация $KMnO_4$, г-экв/л		
	0,05	0,10	0,20
[OH], max_1	9,0	13,6	11,2
[OH], max_2	4,2	6,4	8,8
Всего [OH]	13,2	20,0	19,8
E_{max1}, мВ	335	336	437
E_{max2}, мВ	475	463	573

Табл. 2. Кинетические характеристики процесса окисления гумата натрия растворами $KMnO_4$ разных концентраций

Концентрация $KMnO_4$, г-экв/л	E_{10}	$E_{равн}$	dE/dt	k
0,06	75	59	8,16	0,51
0,12	118	65	16,34	0,31
0,19	139	77	15,81	0,26
0,26	162	77	16,49	0,19

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

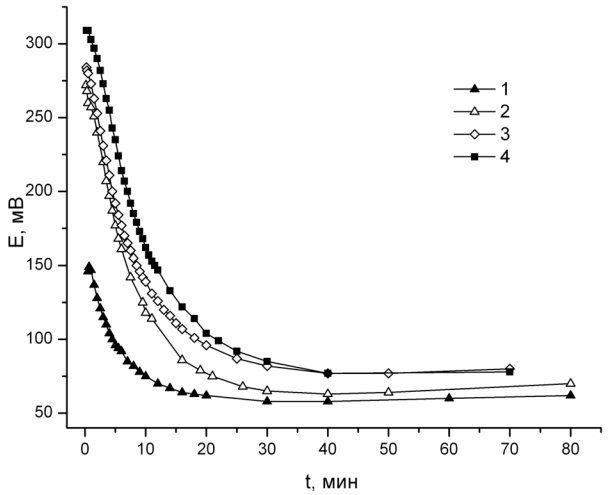


Рис. 2. Изменение окислительно-восстановительного потенциала во времени при добавлении различных количеств $KMnO_4$ к 0,05 %-ному раствору ГН. $KMnO_4$, г-экв/л: *1* – 0,06; *2* – 0,12; *3* – 0,19; *4* – 0,26. pH=11,5

окислителя к диффузии к функциональным группам (OH-) в условиях, осложненных этими эффектами. В целом закономерно, что увеличение концентрации окислителя ($KMnO_4$) приводит к интенсификации процесса окисления OH-групп.

Выводы

1. Показано, что метод потенциометрического окислительно-восстановительного титрования перманганатом калия применим для анализа количества гидроксильных групп в структуре макромолекул гуминовых кислот.

2. Количество определяемых этим методом гидроксильных групп зависит от концентрации $KMnO_4$. Определена минимальная концентрация перманганата калия, которая позволяет надежно определять количество активных гидроксильных групп в макромолекулах гуминовых кислот (C_{KMnO_4} ≈0,1 г-экв/л).

3. Количество определяемых OH-групп в макромолекулах гуминовых кислот при титровании растворами перманганата калия низких концентраций выше, чем при кислотно-основном титровании солей гуминовых кислот растворами соляной кислоты [9]. Это может быть связано с тем, что окислительно-восстановительная система, создаваемая перманганатом калия, не предполагает изменения конформации макромолекул гуминовых соединений и создания условий экранирования части OH-групп фрагментами этих макромолекул.

Список литературы

1. Орлов, Д.С. Гуминовые вещества в биосфере // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – №2. – С. 56-63.
2. Орлов, Д.С. Органическое вещество почв России // Почвоведение. – 1998. – №9. – С. 1049-1057.
3. Перминова, И.В. Анализ, классификация и прогноз свойств гумусовых кислот: дис. … докт. хим. наук: 02.00.02 / Перминова Ирина Васильевна. – М.: МГУ, 2000. – 359 с.
4. Rice, J.A. Statistical evaluation of the elemental composition of humic substances / J.A. Rice, P. MacCarthy // Org. Geochem. – 1991. – Vol.17. – P. 635-648.
5. Covelo, E.F. Heavy metal adsorption by humic umbrisols: selectivity sequences and competitive sorption kinetics / E.F. Covelo, M.L. Andrade, F.A. Vega // J. Colloid Interface Sci. – 2004. – Vol. 280. – P. 1-8.
6. Buschmann, J. Arsenite and arsenate binding to dissolved humic acids: Influence of pH, type of humic acid, and aluminum / J. Buschmann, A. Akappeler, U. Lindauer et al. // Environ. Sci. Technol. – 2006. – Vol.40. – P. 6015-6020.
7. Liu, A. Modeling adsorption of copper (II), cadmium (II) and lead (ll) on purified humic acid / A. Liu, R.D. Gonzalez // Langmuir. – 2000. – Vol.16. – P. 3902-3909.
8. Koopal, L.K. Binding of ionic surfactants to purified humic acid / L.K. Koopal, T.P. Goloub, T.A. Davis // J. Colloid Interface Sci. – 2004. – Vol.275. – P. 360-367.
9. Хилько, С.Л. Особенности потенциометрического титрования солей гуминовых кислот / С.Л. Хилько, А.И. Ковтун, В.И. Рыбаченко // Химия тверд. топлива. – 2011. – №5. – С. 50-62.
10. Gamble, D.S. Potentiometric titration of fulvic acid: equivalence point calculations and acidic functional groups // Can. J. Chem. – 1972. – Vol.50. – P. 2680-2690.
11. Gamble, D.S. Titration curves of fulvic acid / D.S. Gamble, A.W. Underdown // Anal. Chem. – 1980. – Vol. 52. – P. 1901-1908.
12. Paxeus, N. Acid-base properties of aquatic fulvic acid / N. Paxeus, M. Wedborg // Analyt. Chem. Acta. – 1985. – Vol.169. – P. 87-98.
13. Ghosh, K. Macromolecular structures of humic substances / K. Ghosh, M. Schnitzer // Soil Sci. – 1980. – Vol.129. – P. 266-276.
14. Characterization of structure and aggregation processes of aquatic humic substances using small-angle scattering and X-ray microscopy / P.K. Pranzas et al. // Anal. Bioanal. Chem. – 2003. – Vol.376. – P. 618-625.
15. Рябинина, В.Е. Фитохимическое исследование полифенольного комплекса из травы ты-

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

сячелистника обыкновенного / В.Е. Рябинина, Е.Е. Зотова, Н.И. Пономарева // Наука и современность. – 2011. – №9-2. – С. 65-69.
16. Влияние ферментации и кислотности среды на состав и антиоксидантную активность водных растворов чая / В.Е. Рябинина и др. // Химия растительного сырья. – 2014. – №2. – С. 169-175.

Khil'ko S.L. /Cand. Sci. (Chem.)/, Rogatko M.I.
L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry

REDOX TITRATION OF SALTS OF HUMIC ACIDS

Background. *The number of functional groups in the structure of the macromolecules of humic acids is one of the most important characteristics, which determines their reaction ability, their complexing, ion exchange, surfactant and redox properties, and biological activity.*
The most common way to determine the active functional groups in humic acids is the method of homogeneous potentiometric acid-base titration. Determination of the number of carboxyl groups using this method gives comparable and reproducible results. Quantitative determination of hydroxyl groups has disadvantages associated with the inaccurate determination of the equivalence point. The number of hydroxyl groups, calculated from the curves of potentiometric acid-base titration, is determined with a large error. In this context, finding opportunities for more accurate determination of the number of hydroxyl groups in macro-molecules of natural polymers of humic substances is important.
Materials and/or methods. *Humic acid was obtained from analytical samples of brown coal of Alexandria deposits by the standard method – extraction with a 0.1 N solution of alkali. The value of the redox potential (E, mV) was determined on precision multimeter PCT-407 using a redox electrode PO50. The solutions of potassium permanganate were prepared from the standard titers in distilled water.*
Results. *A technique is developed for determining the number of active hydroxyl groups in the macromolecules of humic acids using the method of homogeneous potentiometric reduction-oxidation titration in solutions of potassium permanganate by analogy with the determination of hydroxyl groups in different types in plant extracts.*
Conclusion. *It is shown that the method of potentiometric redox titration with potassium permanganate is applicable for the analysis of the number of hydroxyl groups in the structure of macromolecules of humic acids. The number of the hydroxyl groups determined by this method depends on the concentration of $KMnO_4$. The minimum concentration of potassium permanganate is identified, which allows determining the number of active hydroxyl groups in the macromolecules of humic acids ($C_{KMnO_4} \approx 0.1$ g-eq/l). The amount of the OH-groups in macromolecules of humic acid determined by titration with potassium permanganate of low concentration is higher than by acid-base titration of humic acids with solutions of hydrochloric acid.*

Keywords: *salts of humic acids, potassium permanganate, redox titration, potentiometry.*

Сведения об авторах

С.Л. Хилько
Телефон: +380 (66) 75-79-462
Эл. адрес: sv-hilko@yandex.ru

М.И. Рогатко
Телефон: +380 (95) 619-17-71
Эл. адрес: marina.rogatko@gmail.com

Статья поступила 08.12.2016 г.
© С.Л. Хилько, М.И. Рогатко, 2017
Рецензент д.х.н., проф. Л.Ф. Бутузова

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, НАПРАВЛЯЕМЫМ В РЕДАКЦИЮ

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

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

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

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

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

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

2. Статья, основной текст вместе с рисунками и др. нетекстовыми элементами, должна быть объемом **5…8 полных** страниц формата А4 (210×297 мм) с полями **20** мм с каждой стороны. Рукопись статьи необходимо оформлять с помощью редактора MS Word. Шрифт – Times New Roman, **12** пт, стиль – обычный. Межстрочный интервал – одинарный. Расстановка переносов – автоматическая. Выравнивание – по ширине страницы. Страницы не нумеровать.

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

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

В конце статьи, после списка литературы приводятся инициалы и фамилии авторов, ученые степени, организации, города, название статьи, аннотация и ключевые слова на английском языке

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

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

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

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

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

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

Внимание! Количество формул в статье **не более 5**. Запрещается выполнять формулы с помощью MathCAD или др. аналогичных программ.

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

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

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

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

– электронный вариант статьи (имя файла составляется из фамилий авторов, например, ИвановПетров.doc) и сведений об авторах (имя файла – ИвановПетров_sved.doc).

В сведениях об авторах для каждого соавтора обязательно должен быть указан адрес персональной эл. почты.

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

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

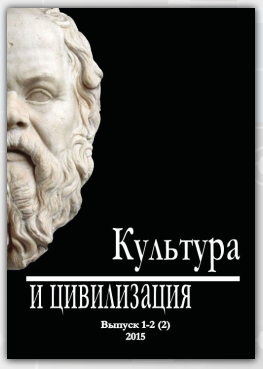
Редакция оставляет за собой право возвращать статьи авторам на доработку в следующих случаях: статья небрежно оформлена и не соответствует требованиям редакции журнала, приведенным выше; статья требует доработки в соответствии с замечаниями рецензента и редакторов; отсутствует сопроводительное письмо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

Требования к рекламно-информационным материалам, публикация которых оплачивается, согласовываются непосредственно с редакцией журнала.

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

НАУЧНЫЕ ИЗДАНИЯ Донецкого национального технического университета

Научный журнал «Культура и цивилизация»



Свид-во о временной регистрации в Министерстве информации ДНР №340 от 06.11.2015

Периодичность – 2 раза в год

Научные направления:
09.00 – Философские науки;
23.00 – Политология;

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

Договор с РИНЦ от 14.06.2016 г. №425-07/2016
Включен в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР (приказ МОН ДНР №1134 от 01.11.2016 г.)



Международный научный журнал «Проблемы горного давления»

Свид-во о временной регистрации в Министерстве информации ДНР №339 от 06.10.2015

ISSN 1682-1092 (print), 2413-581X (online)
Договор с РИНЦ от 14.06.2016 г. №425-07/2016

Периодичность – 4 раза в год

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

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

Сборник научных трудов «Прогрессивные технологи и системы машиностроения»



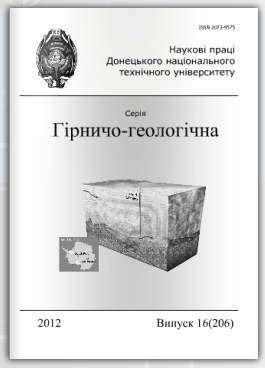
Свид-во о временной регистрации в Министерстве информации ДНР №324 от 06.08.2015

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
01.02 – Механика;
05.02 – Машиностроение и машиноведение;
05.11 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы;

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

ISSN 2073-3216 (print), 2518-7120 (online)
Договор с РИНЦ от 12.04.2013 г. №177-04/2013



Сборник научных трудов «Научные труды ДонНТУ. Серия: горно-геологическая»

Свид-во о временной регистрации в Министерстве информации ДНР №304 от 06.08.2015

ISSN 2073-3216
Договор с РИНЦ от 23.07.2013 г. №427-07/2013

Периодичность – 2 раза в год

Научные направления:
25.00 – Науки о земле;
05.05 – Транспортное, горное и строительное машиностроение;

Сборник научных трудов «Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе»



Свид-во о временной регистрации в Министерстве информации ДНР №310 от 06.08.2015

Периодичность – 2 раза в год

Научные направления:
01.01 – Математика;
05.13 – Информатика, вычислительная техника и управление;
25.00 – Науки о земле;

ISSN 2411-720X (print), 2413-0834 (online)
Договор с РИНЦ от 09.04.2015 г., № 214-04/2015

III МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

III Международная научно-практическая конференция

Инновационные перспективы Донбасса

III Международная научно-практическая конференция

Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса



VII Международная научно-техническая конференция

Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование

XVII Международная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов

Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых

III Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов

Металлургия XXI столетия глазами молодых

г. Донецк

24-26 мая 2017 г.