

Учреждение образования
«Барановичский государственный университет»

Вестник БарГУ

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 4, июнь, 2016.

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала Кочурко Василий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, Заслуженный работник образования Республики Беларусь, ректор учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Заместитель главного редактора журнала Никишова Алла Васильевна, кандидат филологических наук, доцент, проректор по научной работе учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор серии

Алифанов Александр Викторович, лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оборудования и автоматизации производства учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Ответственный секретарь серии

Горбач Юлия Евгеньевна, старший преподаватель кафедры экономики и организации производства инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Редактор текстов на английском языке

Манкевич Жанна Борисовна, кандидат психологических наук, старший преподаватель кафедры теории и практики английского языка учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Гавриленя Андрей Константинович (*ответственный за направление «Машиностроение и машиноведение»*), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой общенаучных дисциплин инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Дубень Игорь Викторович (*ответственный за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»*), кандидат технических наук, доцент кафедры механизации и энергообеспечения производства инженерного факультета, декан факультета довузовской подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Геннадий Иосифович, кандидат технических наук, доцент, доцент учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (Минск, Республика Беларусь).

Белый Алексей Владимирович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Бетяна Григорий Филиппович, кандидат технических наук, доцент, начальник технологического научно-производственного центра учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (Минск, Республика Беларусь).

Гордиенко Анатолий Илларионович, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, начальник Центра индукционных технологий Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Девойно Олег Георгиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть» (Минск, Республика Беларусь).

Добышев Анатолий Семёнович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации животноводства и электрификации сельскохозяйственного производства учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Дремук Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, декан инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Ивашко Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации автомобилей Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Калугин Юрий Константинович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (Гродно, Республика Беларусь).

Карташевич Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клочков Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клубович Владимир Владимирович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, профессор, заведующий лабораторией пластичности Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Ласковнѳ Александр Петрович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, академик-секретарь отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь).

Нерода Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Спиридонов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Томило Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, доцент, директор Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Шелег Валерий Константинович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Адрес редакции:

ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.

Телефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik_barsu@tut.by

Подписные индексы: 00993 — для индивидуальных подписчиков; 009932 — для организаций.

Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07. 2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включён в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам (машиностроение и машиноведение; процессы и машины агроинженерных систем).

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включён в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.

Издатель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

Выходит на русском, белорусском и английском языках.

Журнал распространяется на территории Республики Беларусь

Заведующий редакционно-издательским отделом Е. Г. Хохол
Технический редактор В. В. Кукреш
Компьютерная вёрстка В. В. Кукреш
Корректор С. А. Березнюк

Подписано в печать 13.06.2016. Формат 60 × 84 ¹/₈. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 10,70.
Уч.-изд. л. 5,40. Тираж 75 экз. Заказ .

Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: открытое акционерное общество «Красная звезда». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя и распространителя печатных изданий № 2/7 от 28.10.2013.

Юридический адрес: пер. 1-й Загородный, 3, 220073 Минск.

Почтовый адрес: ул. Советская, 80, 225409 Барановичи.

© БарГУ, 2016

Репозиторий БарГУ

Установа адукацыі
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

Веснік БарДУ

Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 4, чэрвень, 2016.

Серыя «Тэхнічныя навукі»

Заснавальнік: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

Галоўны рэдактар часопіса Качурка Васіль Іванавіч, доктар сельскагаспадарчых навук, прафесар, акадэмік Беларускай інжынернай акадэміі, акадэмік Міжнароднай акадэміі тэхнічнай адукацыі, акадэмік Міжнароднай акадэміі навук педагагічнай адукацыі, акадэмік Акадэміі эканамічных навук Украіны, Заслужаны работнік адукацыі Рэспублікі Беларусь, рэктар установы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Намеснік галоўнага рэдактара часопіса Нікішова Ала Васільеўна, кандыдат філалагічных навук, дацэнт, прарэктар па навуковай рабоце ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ СЕРЫІ

Галоўны рэдактар серыі

Аліфанаў Аляксандр Віктаравіч, лаўрэат Дзяржаўнай прэміі Рэспублікі Беларусь у галіне навукі і тэхнікі, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры абсталявання і аўтаматызацыі вытворчасці ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Адказны сакратар серыі

Горбач Юлія Яўгеньеўна, старшы выкладчык кафедры эканомікі і арганізацыі вытворчасці інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Рэдактар тэкстаў на англійскай мове

Манкевіч Жанна Барысаўна, кандыдат псіхалагічных навук, старшы выкладчык кафедры тэорыі і практыкі англійскай мовы ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Гаўрылена Андрэй Канстанцінавіч (*адказны за напрамак «Машынабудаванне і машыназнаўства»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры агульнанавуковых дысцыплін інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Дубень Ігар Віктаравіч (*адказны за напрамак «Працэсы і машыны аграінжынерных сістэм»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт кафедры механізацыі і энергазабеспячэння вытворчасці інжынернага факультэта, дэкан факультэта даву-заўскай падрыхтоўкі ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Анісковіч Генадзь Іосіфавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт установы адукацыі «Беларускі дзяржаўны аграрны тэхнічны ўніверсітэт» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Белы Аляксей Уладзіміравіч, член-карэспандэнт Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар, намеснік дырэктара па навуковай рабоце Дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны ін-стытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Бяцэня Рыгор Піліпавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, начальнік тэхналагічнага навукова-практычнага цэнтра ўстановы адукацыі «Беларускі дзяржаўны аграрны тэхнічны ўніверсітэт» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Гардзіенка Анатолій Іларыёнавіч, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар, начальнік Цэнтра індукцыйных тэхналогій Дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Дзявойна Алег Георгіевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, загадчык Навукова-даследчай інавацыйнай лабараторыі плазменных і лазерных тэхналогій філіяла Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта «Навукова-даследчая частка» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Добышаў Анатолій Сямёнавіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры механізацыі жывёлага-доўлі і электрыфікацыі сельскагаспадарчай вытворчасці ўстановы адукацыі «Беларуская дзяржаўная сельскагаспа-дарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Драмук Уладзімір Аляксеевіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дэкан інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Івашка Віктар Сяргеевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры тэхнічнай эксплуатацыі аўтамабіляў Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Калугін Юрый Канстанцінавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры машыназнаўства і тэхнічнай эксплуатацыі аўтамабіляў установы адукацыі «Гродзенскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Янкі Купалы» (Гродна, Рэспубліка Беларусь).

Карташэвіч Анатолій Мікалаевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, загадчык кафедры трактараў і аўтамабіляў установы адукацыі «Беларуская дзяржаўная сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Клачкоў Аляксандр Віктаравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар установы адукацыі «Беларуская дзяржаўная сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Клубовіч Уладзімір Уладзіміравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, загадчык лабараторыі пластычнасці Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Ласкаўнёў Аляксандр Пятровіч, доктар тэхнічных навук, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, акадэмік-сакратар аддзялення фізіка-тэхнічных навук Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Нярода Міхаіл Уладзіміравіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры тэхналогіі машынабудавання ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Спірыдонаў Мікалай Васільевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры тэхналогіі машынабудавання Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Таміла Вячаслаў Анатольевіч, доктар тэхнічных навук, дацэнт, дырэктар Дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Шэлег Валерый Канстанцінавіч, член-карэспандэнт Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар, загадчык кафедры тэхналогіі машынабудавання Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Адрас рэдакцыі:

вул. Войкава, 21, 225404, г. Баранавічы.

Тэлефон: +375 163 45 46 28.

E-mail: vestnik_barsu@tut.by

Падпісныя індэксы: 00993 — для індывідуальных падпісчыкаў; 009932 — для арганізацый.

Пасведчанне аб рэгістрацыі сродкаў масавай інфармацыі № 1533 ад 30.07.2012, выдадзенае Міністэрствам інфармацыі Рэспублікі Беларусь.

У адпаведнасці з загадам Вышэйшай атэстацыйнай камісіі Рэспублікі Беларусь ад 21 студзеня 2015 г. № 16 навукова-практычны часопіс «Веснік БарДУ» серыя «Тэхнічныя навукі» ўключаны ў Пералік навуковых выданняў Рэспублікі Беларусь для апублікавання вынікаў дысертацыйных даследаванняў па тэхнічных навуках (машынабудаванне і машыназнаўства; працэсы і машыны аграінжынерных сістэм).

Навукова-практычны часопіс «Веснік БарДУ» ўключаны ў РІНЦ (Расійскі індэкс навуковага цытавання), ліцэнзійны дагавор № 06-01/2016.

Выдавец: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

Выходзіць на рускай, беларускай і англійскай мовах.

Часопіс распаўсюджваецца на тэрыторыі Рэспублікі Беларусь.

Загадчык рэдакцыйна-выдавецкага аддзела А. Г. Хахол

Тэхнічны рэдактар В. У. Кукраш

Камп'ютарная вёрстка В. У. Кукраш

Карэктар С. А. Березнюк

Падпісана да друку 13.06.2016. Фармат 60 × 84 ¹/₈. Папера ксераксная. Друк лічбавы. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10,70. Ул.-выд. арк. 5,40. Тыраж 75 экз. Заказ .

Кошт свабодны.

Паліграфічнае выкананне: адкрытае акцыянернае таварыства «Чырвоная зорка». Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы, распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 2/7 ад 28.11.2013.

Юрыдычны адрас: завул. 1-ы Загарадны, 3, 220073 Мінск.

Паштовы адрас: вул. Савецкая, 80, 225409 Баранавічы.

Educational Institution
“Baranovichi State University”

BarSU Herald

A quarterly scientific and practical journal

Published since March 2013

Issue 4, June, 2016.

Series “Engineering”

Promoter: Educational Institution “Baranovichi State University”.

EDITORIAL BOARD

Editor in Chief: Vasily Ivanovich Kochurko, Rector of Baranovichi State University, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, Academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of the Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Deputy Chief Editor: Alla Vasilyevna Nikishova, Ph. D. in Philology, Vice-rector for Scientific Work of Baranovichi State University, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

THE EDITORIAL BOARD OF THE EDITION

Editor of the issue

Aleksandr V. Alifanov, State-Prize Winner of the Republic of Belarus in the Science and Technology Field, Professor of the Equipment and Manufacturing Automation Chair of Engineering Department, Baranovichi State University, Doctor of Technical Sciences (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Executive secretary of the issue

Juliya E. Gorbach, Senior lecturer of the Economic Organization of Production Chair of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Editor of English texts

Zhanna B. Mankevich, Senior lecturer of the English Language Theory and Practice Chair of Slavic and Germanic Languages Department, Baranovichi State University, Ph. D. in Psychology (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Andrei K. Gavrilena (*in charge of the heading “Machine Building and Engineering Science”*), Head of the Scientific Disciplines Chair of Mechanization and Energy Production Department, Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Igor V. Duben (*in charge of the heading “Processes and Machines of Agroengineering Systems”*), Dean of the Pre-University Training Department, Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Gennady I. Aniskovich, Associate Professor of the Belarusian State Agrarian Technical University, Ph. D. in Technical Sciences (Minsk, the Republic of Belarus).

Alexey V. Bely, Deputy Director for Scientific Work of the State Scientific Institution “The Physical-Technical Institute, the National Academy of Sciences”, A. M. of the National Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Grigory F. Betenya, Head of the Technology Research and Production Center of the Belarusian State Agrarian Technical University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Anatoly I. Gordienko, Head of the Induction Technology Center of the State Research Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences”, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Oleg G. Devoino, Head of the Research Laboratory of Innovative Plasma and Laser Technology of the Belarusian National Technical University branch “Research Section”, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Anatoly S. Dobysh, Professor of the Animal Husbandry Mechanization and Electrification of Agricultural Production Chair of “The Belarusian State Agricultural Academy”, Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus).

Vladimir A. Dremuk, Head of Engineering Department of Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Viktor S. Ivashko, Professor of the Automobile Technical Maintenance Chair of the Belarusian National Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Yury K. Kalugin, Associate Professor of the Engineering Science and Automobile Technical Maintenance Chair of "Grodno State University of Ya. Kupala", Ph. D. in Technical Sciences (Grodno, the Republic of Belarus).

Anatoly N. Kartashevich, Head of the Tractors and Vehicles Chair of the Belarusian State Agricultural Academy, Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus).

Alexandr V. Klochkov, Professor, Professor of the Belarusian State Agricultural Academy, Doctor of Technical Sciences (Gorki, the Republic of Belarus).

Vladimir V. Klubovich, Head of the Plasticity Laboratory of the Belarusian National Technical University, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Alexandr P. Laskovnyov, Academician-secretary of the Physics and Technical Sciences Department of the National Academy of Sciences of Belarus, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences (Minsk, the Republic of Belarus).

Michail V. Neroda, Head of the Mechanical Engineering Chair of Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Nicholai V. Spiridonov, Professor of the Mechanical Engineering Chair of the Belarusian National Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Vyacheslav A. Tomilo, Director of the State Scientific Institution "The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Valery K. Sheleh, Head of the Mechanical Engineering Chair of the Belarusian National Technical University, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Editorial address:

Voikov Str. 21, 225404, Baranovichi.

Phone: +375 163 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by

Subscription indices: 00993 — for individual subscribers; 009932 — for companies.

The certificate of the registration of mass media № 1533 of 30.07. 2012 issued by the Ministry of Information of Belarus.

In accordance with the order of the board of the Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus on January 21, 2015 № 16 the scientific and practical journal "Bulletin of BarSU" the series "Engineering" was included on the list of the scientific publications of the Republic of Belarus for publishing the results of dissertation research in engineering sciences (mechanical engineering and machines, processes and machines of agroengineering systems).

Scientific and practical journal Vestnik BarSU is included into RSCI (Russian Science Citation Index), license agreement № 06-01/2016.

Published: Educational Institution "Baranovichi State University".

Issued in Russian, Belarusian and English.

The journal is distributed on the territory of the Republic of Belarus.

Managing editor E. G. Hohol

Technical editor V. V. Kukresh

Desktop Publishing V. V. Kukresh

Proofreader S. A. Bereznyuk

Signed print 13.06.2016. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox. Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 10.70. Acc.-pub. s. l. 5.40. Circulation of 75 copies. Order

Free price.

Printing performance: Open Joint Stock Company "Red Star". Certificate of the state registration of the publisher, the manufacturer and the distributor of publications № 2/7 since 28.10.2013.

Legal address: 3, 1 Zagorodni Pereulok, 220073 Minsk.

Postal address: 80 Sovietskaya Str., 225409 Baranovichy.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Машиностроение и машиноведение

Алифанов А. В., Горецкий Г. П., Милюкова А. М., Лях А. А., Шишмолин В. Н. Исследование влияния режимов магнитно-импульсной обработки на микротвёрдость и микроструктуру образцов сталей, применяемых для изготовления рубильных ножей	11
Бакулин Б. А., Калугин Ю. К. Анализ химического состава и физико-механических свойств материалов для изготовления деталей батанного механизма ткацкого станка	22
Жоглик И. Н. Эмиссия моноэнергетических ионов V^{2+} , Ti^{2+} , Zr^{2+} в вакуумном электродуговом разряде	29
Здор Г. Н. Экспериментальные исследования прессования вытяжных матриц совместным действием статических и динамических нагрузок высокой интенсивности	35
Ищенко М. В. Износ конвейерной ленты в условиях абразивной химически активной среды калийного предприятия	44
Маркевич М. И., Чапланов А. М., Малышко А. Н., Солодуха В. А., Соловьев Я. А., Сарычев О. Э., Щербакова Е. Н. Формирование и исследование диодов Шоттки на основе силицидов платины и никеля	48
Михайлов М. И. Анализ нагрузочного резервирования сборных внутренних фрез	55
Ракицкий А. А. Исследование усталостной прочности деталей машин с термонапылёнными порошковыми покрытиями в условиях циклического растяжения/сжатия	62

Процессы и машины агроинженерных систем

Бегеня Г. Ф., Анискович Г. И., Кривцов А. В., Рогожинский С. Н. Инновационная технология упрочнения дисков роторов и оснований башмаков режущего аппарата косилок	68
Богданович П. Н., Михайлов М. И., Михайлов К. М. Исследование влияния электрофрикционного упрочнения ножей режущего барабана кормоуборочного комбайна на их износостойкость	77

ЗМЕСТ

ТЭХНІЧНЫЯ НАВУКІ

Машынабудаванне і машыназнаўства

Аліфанаў А. В., Гарэцкі Г. П., Мілюкова Г. М., Лях А. А., Шышмолін В. Н. Даследаванне ўплыву рэжымаў магнітна-імпульснай апрацоўкі на мікрацвёрдасць і мікраструктуру ўзораў сталяў, якія прымяняюцца для вырабу рубільных нажоў	11
Бакулін Б. А., Калугін Ю. К. Аналіз хімічнага складу і фізіка-механічных уласцівасцяў матэрыялаў для вырабу дэталей батаннага механізма ткацкага станка	22
Жоглік І. М. Эмісія монаэнергетычных йонаў V^{2+} , Ti^{2+} , Zr^{2+} у вакуумным электрадугавым разрадзе	29
Здор Г. М. Эксперыментальныя даследаванні прэсавання выцяжных матрыц сумесным дзеяннем статычных і дынамічных нагрузкаў высокай інтэнсіўнасці	35
Ішчанка М. В. Зношванне канвеернай стужкі ва ўмовах абразіўнага хімічна актыўнага асяроддзя калійнага прадпрыемства	44
Маркевіч М. І., Чапланаў А. М., Малышка А. М., Саладуха В. А., Салаўёў Я. А., Сарычаў А. Э., Шчарбакова А. М. Фарміраванне і даследаванне дыёдаў Шоткі на аснове сіліцыдаў плаціны і нікеля	48
Міхайлаў М. І. Аналіз нагрузачнага рэзервавання зборных унутраных фрэз	55
Ракіцкі А. А. Даследаванне стомленаснай трываласці дэталей машын з тэрманапыленымі парашковымі пакрыццямі ва ўмовах цыклічнага расцяжэння/сціскання	62

Працэсы і машыны аграінжынерных сістэм

Бяценья Р. Ф., Анісковіч Г. І., Крыўцоў А. В., Рагажынскі С. М. Інавацыйная тэхналогія ўмацавання дыскаў ротараў і асноў башмакоў рэжучага апарата касілак	68
Багдановіч П. М., Міхайлаў М. І., Міхайлаў К. М. Даследаванне ўплыву электрафрыкцыйнага ўмацавання нажоў рэжучага барабана кармаўборачнага камбайна на іх зносаўстойлівасць	77

CONTENTS

TECHNICAL SCIENCES

Machine Building and Engineering Science

Alifanov A. V., Goretsky G. P., Milyukova A. M., Lyakh A. A., Shishmolin V. N. Research of influence of magnetic-pulse treatment modes on microhardness and microstructure steel samples used for chipper knives manufacture	11
Bakulin B. A., Kalugin Ju. K. Analysis of chemical composition and physical-mechanical properties of materials for loom bata mechanism parts production	22
Zhohlik I. N. Emission of monoenergetic flow of V^{2+} , Ti^{2+} , ZR^{2+} ions in vacuum electroarc discharge	29
Zdor G. N. Experimental study of exhaust pressing matrix via the combined action of static and dynamic loads of high intensity	35
Ishchenko M. V. The conveyor belt wear in an abrasive and chemically active environment of the potash plant	44
Markevich M. I., Chaplanov A. M., Malyshko A. N., Solodukha V. A., Solovyev Ya. A., Sarichev O. E., Shcherbakova E. N. Formation and investigation of Schottky diodes based on platinum and nickel silicide	48
Mikhailov M. I. Analysis of prefabricated internal cutters load backup	55
Rakitsky A. A. Investigation of fatigue strength of machine components with thermal spray coatings under cyclic push/pull conditions	62

Processes and Machines of Agroengineering Systems

Betenya G. F., Aniskovich G. I., Krivtsov A. V., Rogozhinsky S. N. Innovative technology for rotor discs and mower cutterbar shoe base strengthening	68
Bogdanovich P. N., Mikhailov M. I., Mikhailov K. M. Research of influence of electrofriction hardening of forage harvester cutting drum knives on their wear resistance	77

УДК 678.686:547.722

М. В. Ищенко

Закрытое акционерное общество «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством»,
ул. Козлова, 69, 223710 Солигорск, Республика Беларусь +375 (174) 26 35 32, Ontiipr@tut.by

ИЗНОС КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ В УСЛОВИЯХ АБРАЗИВНОЙ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ КАЛИЙНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Представлены результаты исследований процессов, протекающих в зоне фрикционного взаимодействия конвейерной ленты и роликов, изготовленных из стали и композиционного материала, в условиях соледержащей среды калийного производства. Описываются установленные закономерности влияния нагрузки и скорости перемещения ленты, а также присутствия в зоне фрикционного контакта солей хлористого калия и хлористого натрия на интенсивность изнашивания ленты.

Ключевые слова: конвейерная лента; ролики; трение; интенсивность изнашивания.

Рис. 2. Библиогр.: 5 назв.

M. V. Ishchenko

Closed Joint Stock Company "Soligorsk Institute for Resource-Saving Problems with Pilot Production", 69, Kozlova str.,
223710 Soligorsk, the Republic of Belarus, +375 (174) 26 35 32, Ontiipr@tut.by

THE CONVEYOR BELT WEAR IN AN ABRASIVE AND CHEMICALLY ACTIVE ENVIRONMENT OF THE POTASH PLANT

The article reflects the results of studies of the processes taking place in the area of frictional engagement of the conveyor belt and rollers made of steel and composite material in the conditions of salt medium at potash plants. It describes the impact of the established laws of the load and speed of the belt as well as the presence of potash salts and sodium chloride in the area of frictional contact on the conveyor belt wear.

Key words: conveyor belt; rollers; friction; wear rate.

Fig. 2. Ref.: 5 titles.

Введение. Конвейерная лента является самым быстроизнашивающимся и дорогостоящим элементом конвейера. Основной износ ленты происходит при её взаимодействии с роликами конвейера. Данное обстоятельство делает актуальной задачу повышения износостойкости конвейерной ленты в указанном трибосопряжении. Исследования в данном направлении касались разработки материаловедческих, технологических и конструктивных методов повышения долговечности конвейерной ленты [1]. Природа изнашивания металла и резины изучалась в основном при трении в воздушной среде [2]. В значительно меньшей степени изучен процесс изнашивания резины по полимерному композиту и особенности протекания этого процесса в воздушно-соляной среде, характерной для условий эксплуатации конвейерного транспорта в калийном производстве. Практическая важность таких исследований обусловлена большим количеством и значительной протяжённостью ленточных конвейеров, эксплуатируемых отечественной калийной индустрией, а также высокими материальными затратами, связанными с ремонтом и заменой ленты. Цель исследования заключается в том, чтобы оценить влияние содержащихся в окружающей среде солей хлористого натрия и калия на процессы трения и изнашивания пары «конвейерная лента—обечайка ролика» и на основе полученных результатов предложить методы повышения долговечности ленты.

Материалы и методы исследования. Моделирование условий эксплуатации узла «резинотканевая лента—ролик» осуществлялось на машине трения СМТ-1 по схеме «вал—вал» при трении

качения. Скорость относительного перемещения трущихся тел изменялась в интервале 0,2...3,0 м / с. Номинальное давление в контакте ленты с роликом при нормальных условиях транспортирования горной породы соответствовало 0,1...10,0 МПа. Испытания проводили в воздушной и воздушно-соляной среде, содержащей смесь хлористого натрия и хлористого калия в соотношении 1:1. Ролики изготавливались из стали 45 и композитов на основе фенолоформальдегидного олигомера (26 масс. %), базальтовых волокон (48 масс. %) и измельчённой древесины (26 масс. %). Износ сопрягаемых тел оценивали методом взвешивания. Исследование топографии поверхностей трения после изнашивания проводили на металлографическом микроскопе МИМ-8.

Результаты исследования и их обсуждение. Установлено, что интенсивность изнашивания i_h резиноканевой ленты при качении по ролику из стали в воздушно-соляной среде слабо изменяется с увеличением давления p и скорости v относительного перемещения в интервале эксплуатационных режимов нагружения $p < 5$ МПа и $v < 2$ м / с (рисунок 1). В области давлений и скоростей, превышающих нормальные условия эксплуатации конвейера, зависимости $i_h(p, v)$ более существенны. Причина в том, что повышение p и v вызывает рост температуры в зоне трения и всех составляющих трения качения: адгезионной, проскальзывания по Рейнольдсу и гистерезисных потерь.

Зависимость i_h от скорости v графически изображается кривыми с минимумом, положение которого определяется нагрузкой, и находится в интервале v , равном 0,5...1,5 м / с. Она согласуется с зависимостью коэффициента сопротивления качению f_c от скорости перемещения ленты по ролику. Снижение i_h с ростом скорости в области малых её значений связано с уменьшением числа молекулярных цепей, успевающих вступить в контакт с роликом, уменьшением площади контакта и проскальзывания, что приводит к падению f_c . При более высоких скоростях вступившие в контакт со сталью макромолекулы ведут себя как жёсткие образования и более легко разрушаются при приложении сдвигающей нагрузки, обеспечивая тем самым рост интенсивности изнашивания. Анализ показал, что доминирующим видом изнашивания резины в исследуемом диапазоне нагрузок и скоростей является усталостное.

Близкие к описанным выше поверхности отклика $i_h(p, v)$ и $f_c(p, v)$ получены при испытаниях пары «резина—сталь» в воздушной среде. Отличие состоит в том, что трение качения при рабочих нагрузках ($p < 5...7$ МПа) вызывает менее интенсивное изнашивание резины в воздушной среде, чем в воздушно-соляной. В последнем случае проскальзывание ролика вызывает абразивное изнашивание поверхностей трения свободными абразивными частицами, содержащимися в горной породе и налипающими на поверхности трения сопрягаемых тел. При экстремальных нагрузках ($p > 7$ МПа) наблюдается обратная картина: i_h резины в воздушной среде выше, чем в воздушно-соляной, так как при высоких значениях p и отсутствии соляной прослойки резина изнашивается по адгезионному механизму. На её поверхности содержатся следы вырывов и усталостного изнашивания. В воздушно-соляной среде образуется плёнка соли, предохраняющая трущиеся тела от непосредственного контакта и адгезионного взаимодействия.

Исследования процессов, протекающих в зоне фрикционного контакта, показали, что особая роль в изнашивании принадлежит старению (окислению) резины. При длительной эксплуатации в её поверхностном слое происходит разрыв связей в основном скелете молекул и образование свободных радикалов, способных взаимодействовать с молекулами окружающей среды. Это подтверждается

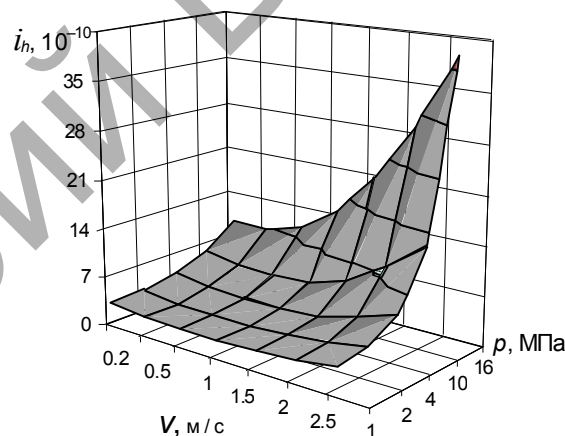


Рисунок 1. — Влияние давления и скорости на линейную интенсивность изнашивания конвейерной ленты при трении качения по ролику из стали в воздушно-соляной среде

интенсивным поглощением кислорода после истечения времени t , равного 6 600 ч. Далее резина окисляется, её поверхностный слой теряет эластичность и сопротивление усталости. Об этом свидетельствуют результаты изучения кинетики изнашивания резины: после приработки и стабилизации триботехнических характеристик наступает период её интенсивного изнашивания. Обнаружено, что окисление резины ускоряется при контакте её со сталью и солями металлов переменной валентности, так как ионы металлов ускоряют процесс распада гидроперекисей. Каталитическое действие стали и хлористых солей металлов на процесс окисления подтверждено данными дифференциально-термического анализа: при введении в навеску резины частиц стали, хлористого натрия и калия высота связанного с её окислением экзотермического пика при температуре 220°C возрастает на 10...15%. Повышение температуры на пятнах фактического контакта способствует локальному старению резины.

Рассмотрим результаты исследования фрикционного взаимодействия конвейерной ленты и роликов из композита (рисунок 2).

Установлено, что при качении в воздушно-соляной среде контакт ленты с роликом из полимерного композита более предпочтителен, что особенно характерно для высоких нагрузок. Так, при трении по

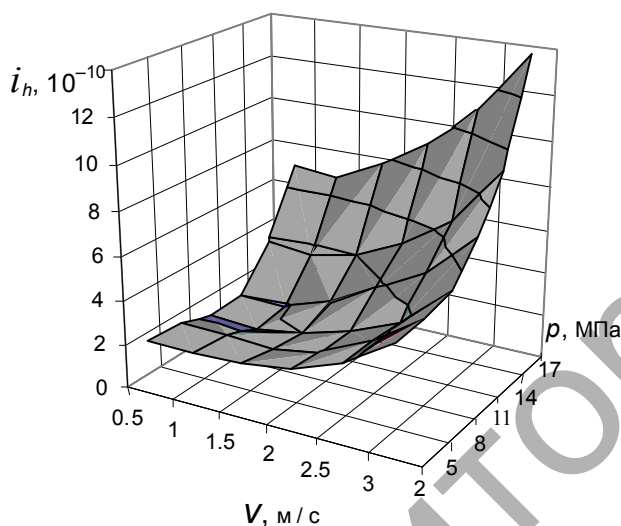


Рисунок 2. — Влияние давления и скорости на линейную интенсивность изнашивания конвейерной ленты при трении качения по ролику из композита в воздушно-соляной среде

стали i_h резины в 1,6...3,0 раза выше, чем по полимерному композиту. Это связано с низкой адгезией композита к резине и горной породе и снижением адгезионного и абразивного изнашивания. Кроме того, композит не выступает в роли катализатора старения резины.

Зависимость $i_h(v)$ немонотонна, что связано с действием двух конкурирующих факторов. При увеличении v до 1,5 м / с время контакта и «оседлой» жизни макромолекул резины на поверхности ролика уменьшаются, снижаются глубина внедрения и растягивающие напряжения на границе выхода неровностей из контакта, которые являются причиной усталостного разрушения поверхностного слоя. При более высоких скоростях i_h возрастает, так как доминирующее влияние начинает оказывать фрикционный нагрев поверхностей трущихся тел, снижающий их модуль упругости и повышающий адгезионную составляющую трения и скорость старения резины.

Выполненные исследования указывают на то, что в ленточных конвейерах, эксплуатирующихся

в воздушно-соляной среде подземных выработок, силивинитовых обогатительных фабрик и солеотвалов, более высокая долговечность транспортирующей ленты будет достигнута при установке роликов с композитными обечайками.

Заключение. Наличие в окружающей среде калийного предприятия хлористых солей калия и натрия вызывает более интенсивное изнашивание ленты конвейера. При этом к усталостному виду изнашивания добавляется абразивное и адгезионное, а нагрузка и скорость оказывают менее существенное влияние на изнашивание. При фрикционном взаимодействии со сталью транспортирующая лента изнашивается в 1,6...2,8 раза более интенсивно, чем при контакте с полимерным композитом, что объясняется более высоким коэффициентом трения резины по стали, ухудшением параметров топографии поверхности стального ролика в воздушно-соляной среде, а также снижением механических характеристик резины в результате окисления и старения поверхностного слоя, активируемого металлом.

При длительном контакте со сталью или солями металлов переменной валентности поверхностный слой резины теряет эластичность и сопротивление усталости. Механизм этого явления обусловлен тем, что ионы металлов ускоряют процесс распада гидроперекисей, происходит разрыв связей в основном скелете молекул и образование свободных радикалов, способных взаимодействовать с молекулами окружающей среды. Скорость протекания этого процесса возрастает при повышении температуры и приложении механической нагрузки.

Список цитируемых источников

1. Морфологические особенности трибологических покрытий из фторсодержащих олигомеров на резинотехнических изделиях / В.А. Струк [и др.] // Трение и износ. 1998. Т. 19. № 5. С. 665—670 ; Покрытия для узлов трения на основе эластомеров / А.А. Дудка [и др.] // Трение и износ. 1998. Т.19. № 3. С. 376—378 ; Екименко А.Н., Колдаев О.Ю., Колдаева С.Н. Технологические и конструктивные особенности повышения работоспособности конвейерного транспорта горнодобывающих производств // Горная механика и машиностроение. 2013. № 3. С. 57—64.
2. Баргенов Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. Л. : Химия, 1972. 240 с. ; Айсе Н.С. Трение и изнашивание полимеров // Трибология. Исследования и приложения. М. : Машиностроение, 1993. С. 176—189.

Поступила в редакцию 06.05.2016.