

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 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. 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 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. 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

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

#### Процессы и машины агроинженерных систем

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

## ЗМЕСТ

### ТЭХНІЧНЫЯ НАВУКІ

#### Машынабудаванне і машыназнаўства

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

#### Працэсы і машыны аграінжынерных сістэм

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

## CONTENTS

### TECHNICAL SCIENCES

#### Machine Building and Engineering Science

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

#### Processes and Machines of Agroengineering Systems

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

УДК 621.795

И. Н. Жоглик

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»,  
ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 369 77 95, ftisipi@mail.ru

### ЭМИССИЯ МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ $V^{2+}$ , $Ti^{2+}$ , $Zr^{2+}$ В ВАКУУМНОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОМ РАЗРЯДЕ

Обнаруженная эмиссия моноэнергетических двухзарядных ионов  $V^{2+}$ ,  $Ti^{2+}$ ,  $Zr^{2+}$  в плазме вакуумного электродугового разряда интерпретируется туннелированием отрицательно заряженных ионов металлов через барьер потенциала катода.

**Ключевые слова:** вакуум; электрический дуговой разряд; плазма; эмиссия; ванадий; титан; цирконий; масс-спектрометр; энергоанализатор; моноэнергетические ионы.

Рис. 4. Библиогр.: 6 назв.

I. N. Zhohlik

State Scientific Institution "Physical-Technical Institute, The National Academy of Sciences of Belarus",  
10, Kuprevicha str., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 369 77 95, ftisipi@mail.ru

### EMISSION OF MONOENERGETIC FLOW OF $V^{2+}$ , $Ti^{2+}$ , $Zr^{2+}$ IONS IN VACUUM ELECTROARC DISCHARGE

The revealed emission of monoenergetic double-charged ions  $V^{2+}$ ,  $Ti^{2+}$ ,  $Zr^{2+}$  in the plasma of vacuum electroarc discharge is realized through tunneling of anions of metals via the barrier of cathode potential.

**Key words:** vacuum; electric arc discharge; plasma; emission; vanadium; titanium; zirconium; mass-spectrometer; energy analyzer; monoenergetic ions.

Fig. 4. Ref.: 6 titles.

**Введение.** Вакуумный электродуговой (далее — ВЭД) разряд используется в ионно-плазменной технологии нанесения покрытий на основе металлов и синтезированных соединений. Стационарный ВЭД-разряд является динамичным многофакторным процессом со значительным уровнем пульсаций и шума, в котором одновременно функционируют несколько физических механизмов эмиссии частиц: термическая электронная и ионная эмиссия, вторичная ион-электронная и ион-ионная эмиссия, микро-взрывы выступов поверхности и др. Величина энергии и заряда ионов, конденсирующихся на подслое, являются одними из основных параметров, определяющими в конечном итоге свойства получаемых покрытий. Тип функции распределения ионов по энергии свидетельствует о физических механизмах эмиссии ионов и характере поведения (типа) катодного пятна, что также имеет практическую пользу. В частности, если энергетический спектр имеет форму распределения Гаусса, а в разряде превалирует катодное пятно первого типа (тепловое), это свидетельствует о недостаточном охлаждении катода, при котором мощность разряда следует снижать. Зависимость энергии и заряда ионов от режимов работы электродуговых испарителей устанавливается эмпирическим путём. Одни из первых работ [1] в СССР по исследованию зарядовых и энергетических характеристик ионов в плазме вакуумного электродугового разряда были проведены с использованием ВЭД-испарителей типа «Булат» со «свободным» катодным пятном. Исследования проводились с помощью радиочастотного масс-спектрометра МХ-7301, оснащённого многосеточным энергоанализатором с регистрацией интегральных энергетических спектров ионов. Функции распределения получались путём пересчёта интегральных спектров.

Опубликованные авторами данные об ионном составе плазмы ВЭД-разряда, величине средней энергии ионов различной степени ионизации сформулировали определённый «плазменный паспорт» вакуумного электродугового испарителя. Однако при дальнейшем развитии ионно-плазменной технологии были разработаны ВЭД-испарители типа «Юнион» с управлением плазменным потоком посредством магнитного поля, которое создавалось несколькими электромагнитными катушками, дающими дополнительные технологические преимущества. Потребовалось провести исследования параметров плазмы, генерируемой испарителями этого типа.

**Методика эксперимента.** Экспериментальное исследование масс-спектров и спектров распределения по энергии ионов ВЭД-разряда проводилось с помощью экспериментальной вакуумной установки [2], созданной на базе вакуумного поста ВУ-1, оснащённой энергоанализаторами интегрального и дифференциального типа на входе масс-спектрометра МХ-7304. Определение средней энергии ионов на заряд проводилось на интегральных многосеточных энергоанализаторах. С их помощью получены зависимости средней энергии и оценочной функции распределения ионов по энергии от тока дуги, напряжённости магнитного поля, давления рабочего газа. Однако получаемые данные не обеспечивают достаточную разрешающую способность по энергии и, как следствие, не дают достоверной картины неоднородностей в энергетических спектрах. Также нежелательным фактором является взаимодействие ионов с электродными сетками, что может приводить к появлению «приборных» ошибок, вызываемых вторичной ион-электронной эмиссией вследствие динаatronного эффекта.

При разработке дифференциальных энергоанализаторов были испытаны различные типы конструкций. Двойной конденсатор с плоско-параллельными или уголковыми электродами обеспечивает более высокое разрешение, но вносит искажения в анализируемый пучок ионов за счёт дополнительного тангенциального ускорения ионов анализирующим полем. Чувствительность (пропускная способность по ионному току) таких энергоанализаторов оказалась низкой из-за значительного пространственного разброса ионов, что на фоне сильнопульсирующего плазменного потока вносит значительную погрешность в характер энергетических спектров. Определён оптимальный вариант конструкции энергоанализатора — двойной цилиндрический конденсатор с углом отклонения  $2 \times 63^\circ$  (рисунок 1).

В первой паре отклоняющих пластин ионы определённой энергии в соответствии с приложенной разностью потенциалов двигаются по центральной круговой орбите между пластинами, ионы других энергий осаждаются на пластинах. Во второй паре пластин ионы отклоняются по такому же принципу на  $63^\circ$  в обратном направлении вращения и на выходе двигаются параллельно входному пучку. Схема двойного аналитического поворота обеспечивает компенсацию пространственной неоднородности (абerrации) пучка. Разработаны также соответствующие блоки управления развёрткой энергоанализатора. Разрешающая способность определяется как отношение величины ионного тока на входе к ионному току на выходе энергоанализатора, в нашем случае имеет уровень 1%. Дополнительным преимуществом разработанного энергоанализатора [3] является возможность сохранять первоначальную

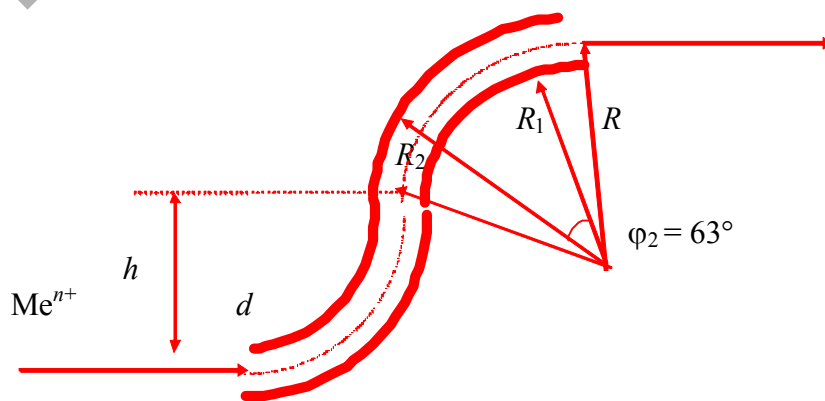


Рисунок 1. — Схема двойного цилиндрического энергоанализатора

юстировку анализатора, производимую по источнику света, для проведения массанализа с энергоанализатором и без него, что достигается за счёт разворота анализатора масс-спектрометра на  $180^\circ$  вокруг своей оси, так как количество крепёжных болтов чётное. Аналогичная конструкция двойного цилиндрического энергоанализатора представлена в работе [4], особенности создания и юстировки прибора также обсуждались при личной встрече с разработчиками.

Входящий пучок ионов  $Me^{n+}$  формируется входной диафрагмой с отверстием диаметром 1 мм и направляется по центральной круговой орбите с радиусом  $R$ . После двойного аналитического поворота на угол  $\varphi_1$ , равный  $63^\circ$ , и  $\varphi_2$ , равный  $63^\circ$ , между двумя парами секторов цилиндров с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , разница которых равна межэлектродному промежутку  $d$ , ионы определённой энергии попадают во входную диафрагму анализатора масс-спектрометра диаметром 1 мм. В соответствии с законами электродинамики движения заряженных частиц в комбинированном электрическом поле постоянного и высокочастотного потенциала на измерительное устройство электрометра попадают положительные ионы с определённым отношением атомного веса к заряду  $M/Z$  (масс-спектрометр не может «различить» ионы с одинаковым  $M/Z$ , например, линии двухзарядных ионов  $Fe^{2+}$  с  $M/Z = 56/2$  и однозарядных ионов  $Si^{1+}$  с  $M/Z = 28/1$  совпадут). Создана лабораторная установка с энергоанализатором (рисунок 2) на основе масс-спектрометра MX-7304, оснащённого энергоанализатором, смонтированным на переходной вакуумной камере с автономной откачной системой магнито-разрядным насосом НМДО-0,1. ВЭД-испаритель аксиального типа установлен по оси анализатора на нижней плите вакуумной камеры ВУ-1.

С помощью электрометра производится измерение ионного тока, т. е. плотности потока ионов через диафрагму. Фильтрация ионов по энергии, т. е. масс-анализ после прохождения ионами энергоанализатора с фиксированным уровнем энергии, обеспечивает существенное улучшение разрешающей способности масс-спектрометра по массе, что, в условиях анализа сильно пульсирующего плазменного потока с большим уровнем шума, даёт возможность получить чёткое разделение линий изотопов через одну а. е. м., например, при анализе ионного состава в плазме молибдена, который, как известно, имеет семь стабильных изотопов  $Mo_{92}$ ,  $Mo_{94}$  —  $Mo_{98}$ ,  $Mo_{100}$ . Приведём масс-спектр изотопного состава однозарядных ионов  $Mo^{1+}$  (рисунок 3). Результаты расчёта парциального состава изотопов молибдена

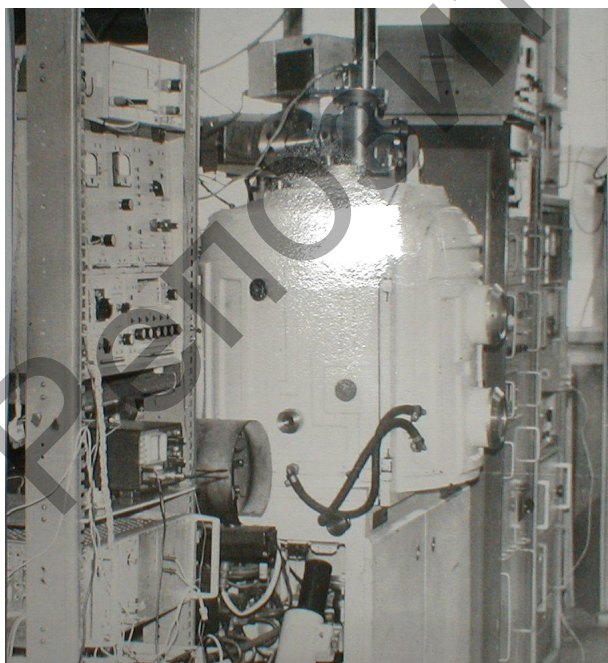


Рисунок 2. — Экспериментальная установка ВУ-1; энергоанализатор с магнито-разрядным насосом расположен на верхнем фланце

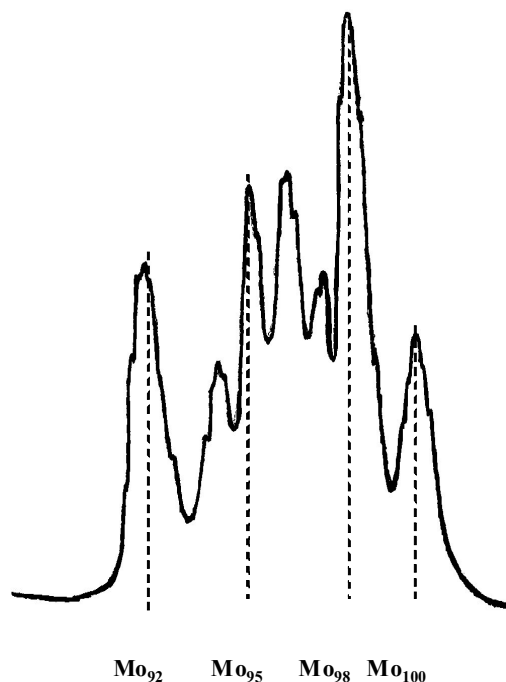


Рисунок 3. — Масс-спектр молибдена на уровне энергии ионов 130 эВ, при токе дуги 80 А, напряжённости магнитного поля 10 мТ

и других исследованных металлов полностью совпадают со справочными данными, что подтверждает корректность разработанной методики ионно-плазменного энергомассанализа, в том числе для исследования изотопного состава металлов.

С помощью созданного энергомассанализатора можно получать масс-спектры с разрешением по массе лучше 1 а. е. м., производить измерение величины энергии ионов заданного отношения атомного веса к заряду, регистрировать спектры распределения ионов по энергии в условиях анализа сильно пульсирующего нестабильного ВЭД-разряда.

**Результаты исследований и их обсуждение.** При исследовании интегральных энергетических спектров и ионного состава ВЭД-разряда на катодах из ряда металлов Al, Cu, Fe, Mo, Ti, V, Zr, сплавов NiCr, CoCr, TiSi, AlSi и других, применяющихся для получения покрытий в вакууме, установлено, что в некоторых случаях появляется неоднородность в виде перегибов на «кривой задержки», причём в месте перегиба ионный ток возрастал по мере увеличения анализирующего потенциала, «отсекающего» ионы с меньшей энергией. Поскольку это не логично с точки зрения физики, исследования функций распределения ионов по энергии в дальнейшем проводились с помощью дифференциальных энергоанализаторов. Факт регистрации «перегибов» в интегральных энергетических спектрах ионов  $Ti^{2+}$  также был подтверждён авторами работы [5] при личной встрече.

Сотни дифференциальных спектров распределений ионов всех регистрируемых зарядов исследованного указанного ряда металлов и сплавов были получены с помощью двойного цилиндрического анализатора и масс-спектрометра MX-7304 в различных режимах работы ВЭД-испарителя по току электродугового разряда, напряжённости магнитного, давлению рабочих газов. Особенное внимание уделялось появлению в спектрах неоднородностей и пиков (линий).

Обнаруженные в спектрах распределений по энергии двухзарядных ионов Ti, Zr, полученных с помощью двойного цилиндрического энергоанализатора и масс-спектрометра, узкие интенсивные пики на уровне энергии 15...20 эВ свидетельствуют об эмиссии моноэнергетических ионов. В наибольшей степени эффект проявляется в спектрах энергий ионов  $V^{2+}$ , интенсивность линии пика может превышать уровень максимума экспоненциального распределения «обычных» ионов в десятки раз. Условия появления в плазме моноэнергетических ионов пока точно не установлены, известно, что остаточное давление должно быть довольно низким ( $<10^{-3}$  Па), содержание химически активных компонентов остаточной атмосферы  $H_2O$  и  $N_2$  минимально. В масс-спектре парциальное давление  $H_2$ ,  $H_2O$  и  $N_2$  практически выравнивается за счёт дополнительного геттерного поглощения при длительном ВЭД-разряде, как правило, в остаточной атмосфере  $H_2O$  — 50%,  $N_2$  — 35%,  $H_2$  — 5%.

Моноэнергетические пики в дифференциальных энергетических спектрах начинают появляться, как правило, после достаточно продолжительной (более часа) работы ВЭД-испарителя. Амплитуда пика растёт от спектра к спектру (развёртка одного энергетического спектра занимает, как правило, 5...10 мин, спектры с более высокой скоростью записи приобретают искажённую форму ввиду значительной пульсации плазменного пучка).

Характер катодных пятен при ВЭД-разряде в режиме генерации моноэнергетического потока ионов  $V^{2+}$  отличается от обычного тем, что вся рабочая поверхность катода превращается в сплошное катодное пятно или сеть визуально неразличимых пятен, что напоминает так называемый распределённый разряд на горячем катоде, при котором со всей расплавленной рабочей поверхности катода осуществляется эмиссия и испарение частиц.

Спектр распределений по энергии ионов  $V^{2+}$  при токе разряда 60 А и напряжённости магнитного поля 20 мТ с «обычной» эмиссией показан пунктиром, с аномальной эмиссией — сплошной линией (рисунок 4). В спектрах ионов  $V^{3+}$  аналогичный пик присутствует в незначительной степени. В спектрах однозарядных ионов появление пиков не наблюдается.

Первоначально предполагалось, что природой явления, исходя из характера проявления, может быть резонансная эмиссия [6], однако при детальном изучении и анализе спектров с моноэнергетическими ионами установлено отсутствие симметричности резонансной кривой и «размывания» её при уменьшении амплитуды пика, следовательно, резонанс не может быть главным физическим механизмом. В работе [7] предполагается, что основную роль в развитии эффекта моноэнергетической эмиссии

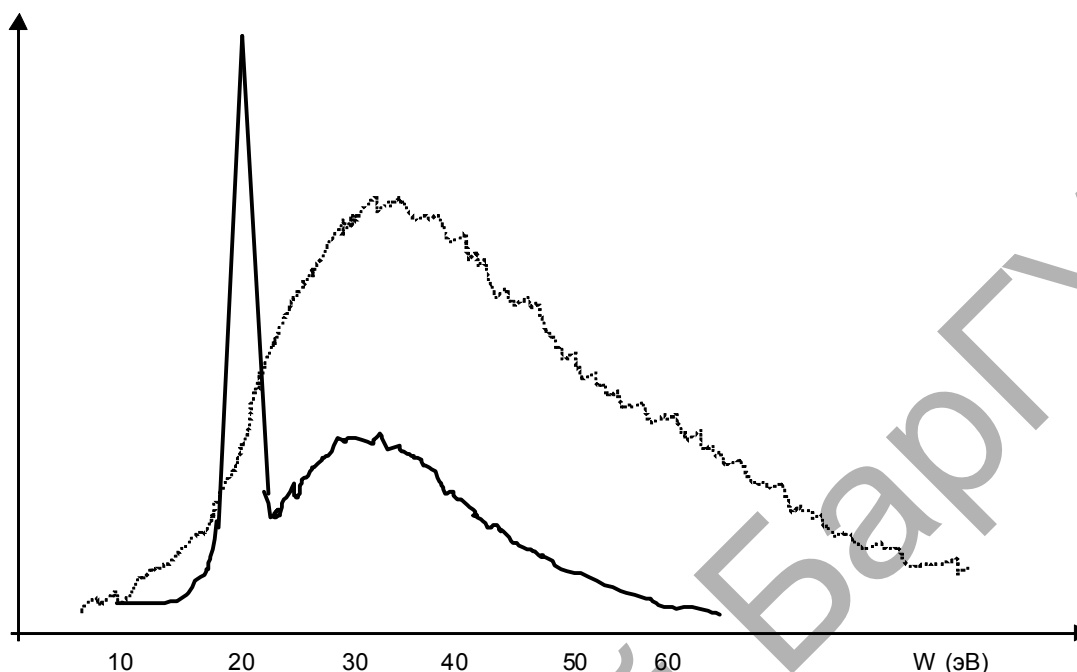


Рисунок 4. — Распределение ионов  $V^{2+}$  по энергии при токе дугового разряда 60 А, напряжённость магнитного поля 20 мТ с обычной и аномальной эмиссией

играют ионы с отрицательным зарядом. Эмиссия в таком случае может происходить по следующей схеме: ионы ванадия и электроны, выброшенные из эмиссионного катодного пятна, имеющие широкий энергетический спектр с экспоненциальной функцией распределения, в прикатодном пространстве двойного электрического слоя после оттока электронов перераспределяются по направлению движения — ионы с энергией больше катодного потенциала преодолевают барьер отрицательного электрического поля катода, положительно заряженные ионы с энергией меньше, чем катодное падение потенциала, притягиваются отрицательным потенциалом катода обратно. На поверхности катода положительно заряженные ионы нейтрализуются и перезаряжаются отрицательным зарядом «налипанием» электронов, затем отталкиваются отрицательным потенциалом катода и приобретают одинаковую энергию, тем самым создавая моноэнергетический поток. В анодном слое слабо связанные ассоциированные «налипшие» и валентные электроны отрываются от ионов за счёт притяжения положительного потенциала катода. Создаётся резонансная перезарядка ионов с положительного в отрицательный потенциал и обратно в положительный в «резонаторе», создающимся рабочей поверхностью катода и двойным электрическим слоем Дебая.

Для определения влияния тех или иных факторов эмиссии и ускорения ионов нужны дополнительные эксперименты по повышению разрешающей способности энергоанализатора. Если линия пика будет более узкой, т. е. это будет кривой пропускающей способности прибора, то может оказаться, что мы имеем дело с исключительно моноэнергетической эмиссией, а её природой может служить туннелирование. Если предположить, что по каким-то причинам на поверхности катода образуются слабо связанные атомы металла за счёт формирования плёнки ионами обратного потока, не требующие энергетических затрат на работу выхода, либо за счёт летучести соединений, например, гидридов  $H_2V$ , туннелирование возможно, и оно объясняет моноэнергетическую эмиссию. Если в результате дополнительных исследований с помощью более точных и чувствительных масс-анализаторов подтвердится сужение моноэнергетического пика, тогда окажется, что мы действительно имеем дело с моноэнергетическим пучком таких «тяжёлых» частиц, как ионы металлов. В этом случае появляется возможность создавать генераторы пучков моноэнергетических ионов, с помощью которых можно калибровать с высокой точностью масс-анализаторы, а они, в свою очередь, могут быть использованы, например, для исследования околосолнечной плазмы как источника энергии.

**Заключение.** Обнаруженная возможность вакуумного электродугового разряда создавать пучки многозарядных ионов некоторых металлов с моноэнергией не нашла ещё своего объяснения и теории, но, тем не менее, она открывает перспективу практического использования этого эффекта. Возможна разработка ионно-плазменной технологии разделения изотопов металлов. В настоящее время проводятся работы по использованию плазменных пучков вакуумного электродугового разряда в качестве плазмотермического инструмента, в котором используется принцип воздействия на материалы мощных импульсов ионного тока с энергией 1...2 кэВ, чередующихся с импульсами электронного тока эквивалентной мощности, при котором достигается значительное ускорение диффузионных процессов при соединении материалов. Разрабатываются технологии пайки и получения биметаллов ионно-плазменным методом.

#### Список цитируемых источников

1. Лунев В.М., Овчаренко В.Д., Хороших В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги // Журнал технической физики. 1977. Т. 47. № 7. С. 1486—1490.
2. Установка для энергомассанализа процессов ионно-плазменного напыления / Мрочек Ж.А. [и др.] // Вакуумная техника и технология. 1991. Т. 1. № 2. С. 56—59.
3. Энергомассанализатор : а. с. 1707651 СССР : Н 01 J 49/46 / Ж.А. Мрочек, И.Н. Жоглик, В.И. Рулинский, С.Ф. Комлик ; дата публ. 23.01.1992.
4. Энергомассанализатор для космической плазмы : а. с. 1061193 СССР / В.Т. Коган, Б.Г. Кошевенко, А.К. Павлов, А.А. Харченко, Ю.В. Чичагов ; дата публ. 1983.
5. Лунев В.М., Овчаренко В.Д., Хороших В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги. С. 1486—1490.
6. Жоглик И.Н. Резонансная эмиссия ионов металлов вакуумной электрической дугой // Доклады АНБ. 1991. Т. 35. № 10. С. 900—902.
7. Zhohlik I.N. Emission of monoenergetic flow of  $V^{2+}$ ,  $Ti^{2+}$ ,  $Zr^{2+}$  ions from vacuum electroarc discharge // Proceedings of the VI-th International conference on Plasma Physics and Plasma Technology. Minsk. 2009. P. 171—174.

Поступила в редакцию 20.05.2016.