

Учреждение образования  
«Барановичский государственный университет»

## **Вестник БарГУ**

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 7, июнь, 2019.

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* Климук Владимир Владимирович, кандидат экономических 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 информационных технологий и физико-математических дисциплин инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

#### **Редактор текстов на английском языке**

Пинюта Ирина Вячеславовна, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры профессиональной иноязычной подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Гавриленя Андрей Константинович (*ответственный за направление «Машиностроение и машиноведение»*), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии 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 технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии инженерного факультета, декан факультета довузовской подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Геннадий Иосифович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий и организации технического сервиса 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).

Гордиенко Анатолий Илларионович, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник 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).

Дремук Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии 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, автомобилей и машин для природообустройства учреждения образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клочков Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сельскохозяйственных машин учреждения образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клубович Владимир Владимирович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, профессор, главный научный сотрудник Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (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).

Томило Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением Белорусского национального технического университета (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.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» включѳн в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам*

*Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включѳн в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-1/2016.*

*Издатель:* учреждение образования «Барановичский государственный университет».

Выходит на русском, белорусском и английском языках.

Журнал распространяется на территории Республики Беларусь.

---

*Заведующий редакционно-издательской группой С. А. Березнюк*

*Технический редактор Е. И. Березич*

*Компьютерная вѳрстка С. А. Березнюк*

*Корректор С. А. Березнюк*

Подписано в печать 14.06.2019. Формат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,75. Уч.-изд. л. 8,10. Тираж 75 экз. Заказ

Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: Гродненское областное унитарное полиграфическое предприятие «Слонимская типография». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/203 от 07.03.2014, № 2 от 25.02.2014.

Адрес: ул. Хлюпина, 16, 231800 Слоним, Гродненская обл.

© БарГУ, 2019

Установа адукацыі  
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

## *Веснік БарДУ*

Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 7, чэрвень, 2019.

Серыя «Тэхнічныя навукі»

*Заснавальнік:* установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

### РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ

*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* Клімук Уладзімір Уладзіміравіч, кандыдат эканамічных 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 інфармацыйных тэхналогій і фізіка-матэматычных дысцыплін інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

#### Рэдактар тэкстаў на англійскай мове

Пінюта Ірына Вячаславаўна, кандыдат педагагічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры прафесійнай іншамоўнай падрыхтоўкі ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Гаўрыленя Андрэй Канстанцінавіч (*адказы за напрамак «Машинабудаванне і машыназастава»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры тэхнічнага забеспячэння сельскагаспадарчай вытворчасці і аграноміі інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Дубень Ігар Віктаравіч (*адказы за напрамак «Працэсы і машыны аграрна-інжынерных сістэм»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт кафедры тэхнічнага забеспячэння сельскагаспадарчай вытворчасці і аграноміі інжынернага факультэта, дэкан факультэта давузаўскай падрыхтоўкі ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Анісковіч Генадзь Іосіфавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры тэхналогіі і арганізацыі тэхнічнага сервісу ўстановы 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 інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Гардзіенка Анатолій Іларыёнавіч, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар, галоўны навуковы супрацоўнік 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).

Драмук Уладзімір Аляксеевіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры тэхнічнага забеспячэння сельскагаспадарчай вытворчасці і аграноміі 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, аўтамабіляў і машын для прыродаўладкавання ўстановы адукацыі «Беларуская дзяржаўная ордэнаў Кастрычніцкай Рэвалюцыі і Працоўнага Чырвонага Сцяга сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Клачкоў Аляксандр Віктаравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры сельскагаспадарчых машын установы адукацыі «Беларуская дзяржаўная ордэнаў Кастрычніцкай Рэвалюцыі і Працоўнага Чырвонага Сцяга 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).

Таміла Вячаслаў Анатолевіч, 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.by](mailto:vestnik@barsu.by).

*Папісныя 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 навук (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-выдавецкай групы* С. А. Беразнюк

*Тэхнічны рэдактар* А. І. Бярэзіч

*Камп'ютарная вёрстка* С. А. Беразнюк

*Карэктар* С. А. Беразнюк

Падпісана да друку 14.06.2019. Фармат 60 × 84 1/8. Папера ксераксная. Друк лічбавы. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 12,75. Ул.-выд. арк. 8,10. Тыраж 75 экз. Заказ

Кошт свабодны.

Паліграфічнае выкананне: Гродзенскае абласное ўнітарнае паліграфічнае прадпрыемства «Слоніўская тыпаграфія». Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы, распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 1/203 ад 07.03.2014, № 2 ад 25.02.2014.

Адрас: вул. Хлюпіна, 16, 231800 Слонім, Гродзенская вобл.

© БарДУ, 2019

Educational institution  
“Baranovichi State University”

*BarSU Herald*

**A quarterly scientific and practical journal**

Published since March 2013.

Volume 7, June, 2019.

Engineering Series

---

*Promoter:* educational institution “Baranovichi State University”.

#### **EDITORIAL BOARD**

*Editor-in-Chief* Vasilij Ivanovich Kochurko, Doctor of Agriculture, Professor, Member of the Belarusian Academy of Engineering, Member of the International Academy of Technical Education, Member of the International Academy of Pedagogical Education, Member of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Distinguished educator of the Republic of Belarus, Rector of the educational institution “Baranovichi State University” (Baranovichi, the Republic of Belarus).

*Deputy Editor-in-Chief* Vladimir Vladimirovich Klimuk, Ph. D. in Economic Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for research of the educational institution “Baranovichi State University” (Baranovichi, the Republic of Belarus).

#### **EDITORIAL BOARD OF THE SERIES**

##### **Editor of the issue**

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

##### **Executive secretary of the issue**

Juliya E. Gorbach, Senior lecturer of the Information Technology and Physical and Mathematical Disciplines Chair of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

##### **English Text Editor**

Iryna V. Piniuta, Ph. D. in Education, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Professional Foreign Language Training of Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

Igor V. Duben (*in charge of the heading “Processes and Machines of Agro-engineering Systems”*), Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Technical Support of Agricultural Production and Agronomy Chair, Dean of the Pre-University Training Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

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

Anatoly I. Gordienko, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the State Research Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, the Republic of Belarus).

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

Vladimir A. Dremuk, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Technical Support of Agricultural Production and Agronomy Chair of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

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

Anatoly N. Kartashevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Tractors, Cars and Machines for Environmental Engineering Chair of the Belarusian State of the Orders of the October Revolution and the Order of the Labour Red Banner Agricultural Academy (Gorki, the Republic of Belarus).

Alexandr V. Klochkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor Agricultural Machinery Chair of the Belarusian State of the Orders of the October Revolution and the Order of the Labour Red Banner Agricultural Academy (Gorki, the Republic of Belarus).

Vladimir V. Klubovich, Doctor of Technical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Chief Researcher of the State Research Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, the Republic of Belarus).

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

Vyacheslav A. Tomilo, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal Pressure Treatment of the Belarusian National Technical University (Minsk, the Republic of Belarus).

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

*Editorial address:*

21 Voykova Str., 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* S. A. Bereznyuk  
*Technical editor* E. I. Berezich  
*Desktop Publishing* S. A. Bereznyuk  
*Proofreader* S. A. Bereznyuk

Signed print 14.06.2019. Format 60 x 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Paper xerox. Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 12.75. Acc.-pub. s. l. 8.10. Circulation of 75 copies. Order

Free price.

Printing performance: Grodno Regional Printing Unitary Enterprise “Slonim printing establishment”. The state registration certificate of the publisher, manufacturer and publications distributor № 1/203 of 07.03.2014, № 2 of 25.02.2014.

Address: 16 Hlyupin St., 231800 Slonim, Grodno region.

© BarSU, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<b>Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Сенчуров Е. В., Дубновицкий С. К.</b> Магнитно-абразивная обработка маховичков водопроводных вентиляей . . . . .	10
<b>Алехнович В. Н., Алифанов А. В., Милюкова А. М., Толкачева О. А.</b> Разработка наплавочного плазмотрона, работающего на постоянно-импульсном напряжении . . . . .	19
<b>Алехнович В. Н., Алифанов А. В., Милюкова А. М., Толкачева О. А.</b> Разработка порошкового питателя, позволяющего осуществлять работу наплавочного плазмотрона в постоянно-импульсном режиме . . . . .	24
<b>Алифанов А. В., Богданович И. А., Русан С. И., Цуран В. В.</b> Обоснование разработки усовершенствованного высокоточного, высокопроизводительного метода заточки режущего лезвия геликоидальных рубильных ножей . . . . .	29
<b>Голубев В. С., Вегера И. И., Чернашеюс О., Чаевский В. В.</b> Лазерная обработка материалов с изменением химического состава поверхностного слоя . . . . .	34
<b>Горчанин А. И., Милюкова А. М., Лях А. А.</b> Повышение эффективности упрочняющей магнитно-импульсной обработки ножей со сложным профилем лезвия . . . . .	43
<b>Жигалов А. Н.</b> Математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом . . . . .	49
<b>Кулешов А. К., Углов В. В., Русальский Д. П.</b> Формирование износостойких слоистых покрытий из карбидов молибдена, вольфрама и кобальта на твердосплавном инструменте . . . . .	64
<b>Малеронок В. В., Алифанов А. В., Богданович И. А.</b> Метод исследования упрочненного слоя металлических образцов с использованием токов высокой частоты . . . . .	70
<b>Михайлов М. И., Мельников В. В.</b> Повышение работоспособности вытяжных конусов стана тонкого волочения . . . . .	76

### ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

<b>Клочков А. В., Шкуратов С. С.</b> Скорость падения зерен в восходящем воздушном потоке . . . . .	83
<b>Михайлов К. М., Михайлов М. И.</b> Моделирование напряженно-деформированного состояния опоры измельчающего барабана кормоуборочного комбайна . . . . .	90
<b>Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Сергей А. И.</b> Исследование кинематической вязкости полусинтетических моторных масел, используемых в дизельных двигателях механических транспортных средств . . . . .	96

## ЗМЕСТ

### МАШЫНАБУДАВАННЕ І МАШЫНАЗНАЎСТВА

<b>Акуловіч Л. М., Сяргееў Л. Я., Сенчуроў Я. В., Дубнавіцкі С. К.</b> Магнітна-абразіўная апрацоўка махавічкоў водаправодных вентыляў . . . . .	10
<b>Аляхновіч В. М., Аліфанаў А. В., Мілюкова Г. М., Талкачова В. А.</b> Распрацоўка наплавачнага плазматрона, які працуе на пастаянна-імпульсным напружанні . . . . .	19
<b>Аляхновіч В. М., Аліфанаў А. В., Мілюкова Г. М., Талкачова В. А.</b> Распрацоўка парашковага сілкавальніка, які дазваляе ажыццяўляць работу наплавачнага плазматрона ў пастаянна-імпульсным рэжыме . . . . .	24
<b>Аліфанаў А. В., Багдановіч І. А., Русан С. І., Цуран У. У.</b> Абаснаванне распрацоўкі ўдасканаленага высокадакладнага, высокапрадукцыйнага метада заточвання рэжучага ляза гелікаідальных рубільных нажоў . . . . .	29
<b>Голубеў В. С., Вегера І. І., Чарнашэюс А., Чаеўскі В. В.</b> Лазерная апрацоўка матэрыялаў са змяненнем хімічнага складу паверхневага слою . . . . .	34
<b>Гарчанін А. І., Мілюкова Г. М., Лях А. А.</b> Павышэнне эфектыўнасці ўмацавальнай магнітна-імпульснай апрацоўкі нажоў са складаным профілем ляза . . . . .	43
<b>Жыгалаў А. М.</b> Матэматычная мадэль і метадыка параметрычнай аптымізацы зношвання і рэсурснай стойкасці рэжучага цвёрдасплаўнага інструмента, умацаванага аэрадынамічным гукавым метадам . . . . .	49
<b>Куляшоў А. К., Углоў У. В., Русальскі Д. П.</b> Фарміраванне зносаўстойлівых слаістых пакрыццяў з карбідаў малібдэна, вольфрама і кобальта на цвёрдасплаўным інструменце . . . . .	64
<b>Маляронак У. У., Аліфанаў А. В., Багдановіч І. А.</b> Метад даследавання ўмацаванага пласта металічных узораў з выкарыстаннем токаў высокай частаты . . . . .	70
<b>Міхайлаў М. І., Мельнікаў У. В.</b> Павышэнне працаздольнасці выцяжных конусаў стана тонкага валачэння . . . . .	76

### ПРАЦЭСЫ І МАШЫНЫ АГРАНЖЫНЕРНЫХ СІСТЭМ

<b>Клачкоў А. В., Шкуратаў С. С.</b> Хуткасць падзення зярнят ва ўзыходзячым паветраным патоку . . . . .	83
<b>Міхайлаў К. М., Міхайлаў М. І.</b> Мадэляванне напружана-дэфармаванага стану апоры здрабняльнага барабана кормаўборачнага камбайна . . . . .	90
<b>Піваварчык А. А., Гаўрыленя А. К., Сяргей А. І.</b> Даследаванне кінематычнай вязкасці паўсінтэтычных маторных масел, якія выкарыстоўваюцца ў дызельных рухавіках механічных транспартных сродкаў . . . . .	96

## CONTENTS

### MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

<b>Akulovich L. M., Sergeev L. E., Senchurov E. V., Dubnovitskiy S. K.</b> Magneto-abrasive machining of flywheels of the water supply valves . . . . .	10
<b>Alehnovich V. N., Alifanov A. V., Miliukova A. M., Tolkachova O. A.</b> Development of the supply plasmatron working on constant-pulse voltage . . . . .	19
<b>Alehnovich V. N., Alifanov A. V., Miliukova A. M., Tolkachova O. A.</b> Development of powder feeder, allowing the operation of the surface plasmotron in constant-pulse mode . . . . .	24
<b>Alifanov A. V., Bogdanovich I. A., Rusan S. I., Tsuran V. V.</b> Justification of the development of an improved high-precision, high-performance method of cutting blade of helicoidal cutting blades . . . . .	29
<b>Golubev V. S., Vegera I. I., Chernasheyus O., Chaevsky V. V.</b> Laser treatment of materials with change of chemical composition of the surface layer . . . . .	34
<b>Harchanin A. I., Miliukova A. M., Lyah A. A.</b> Improving the efficiency of the hardening magnetic-pulse processing of blades with a complex blade profile . . . . .	43
<b>Jigalov A. N.</b> Mathematical model and method of parametric optimization of run-out and resource durability of cutting hardware tool hardened by aerodynamic sound method . . . . .	49
<b>Kuleshov A. K., Uglov V. V., Rusalsky D. P.</b> Formation of wear resistant layered coatings of molybdenum carbides, tungsten and cobalt on a hard alloy tool . . . . .	64
<b>Maleronok V. V., Alifanov A. V., Bogdanovich I. A.</b> Research method of the metal samples strengthened layer using high-frequency currents . . . . .	70
<b>Mikhailov M. I., Melnikov V. V.</b> Improvement of the efficiency of exhaust cones of a fine-drawing mill . . . . .	76

### PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

<b>Klochkov A. V., Shkuratov S. S.</b> Speed of grain fall in a rising air flow . . . . .	83
<b>Mikhailov K. M., Mikhailov M. I.</b> Modeling of the tense-deformed state of the support of the chopping drum of forage harvester . . . . .	90
<b>Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Sergey A. I.</b> Study of kinematic viscosity of semisynthetic motor oils, used in diesel engines of mechanical vehicles . . . . .	96

УДК 621.7/9.048.7

**К. М. Михайлов, М. И. Михайлов**

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Министерство образования Республики Беларусь, пр. Октября, 48, 246746 Гомель, +375 (032) 24 77 54, Mihailov@gstu.by

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРЫ ИЗМЕЛЬЧАЮЩЕГО БАРАБАНА КОРМОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Исследовано напряженно-деформированное состояние опор измельчающего барабана кормоуборочного комбайна. Выполнен анализ влияния нагрузки на напряжения, деформации и перемещения опор качения и модельной конструкции. Установлена эквивалентная конструкция, позволяющая сократить объем расчетов на ЭВМ.

**Ключевые слова:** кормоуборочный комбайн; измельчающий барабан; опоры; моделирование.

Рис. 6. Библиогр.: 13 назв.

**K. M. Mikhailov, M. I. Mikhailov**

Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 48 October Ave., 246746 Gomel, the Republic of Belarus, +375 (232) 24 77 54, Mihailov@gstu.by

## MODELING OF THE TENSE-DEFORMED STATE OF THE SUPPORT OF THE CHOPPING DRUM OF FORAGE HARVESTER

The tense-deformed state of the supports of the chopping drum of the forage harvester has been investigated. The analysis of the load effect on the tense, deformation and displacement of rolling bearings and the model construction has been done. An equivalent model has been installed to reduce calculations on the computer.

**Keywords:** forage harvester; chopping drum; supports; modeling.

Fig. 6. Ref.: 13 titles.

**Введение.** Одной из главных проблем отечественных предприятий обрабатывающей промышленности является обеспечение качества выпускаемых изделий. Особенно остро во всех отраслях машиностроения стоит вопрос обеспечения надежности технологического оборудования и продукции.

Как показывает практика, большинство отказов механизмов и машин приходится на узлы трения [1; 2]. Так, основной причиной потери работоспособности подшипника качения при нормальных условиях эксплуатации является усталостное выкрашивание поверхностей качения. Указанный вид износа является следствием циклически изменяющихся контактных нагрузок, передаваемых через относительно небольшие площадки контакта. Причиной такого разрушения является возникновение контактных напряжений, которые могут превышать пределы прочности материалов взаимодействующих деталей.

В практике используется множество методов повышения долговечности узлов качения, наибольшее распространение среди которых нашло применение смазочных материалов и новых подшипниковых материалов [3—8].

В настоящее время вопрос взаимодействия деталей подшипника под нагрузкой освещен явно недостаточно. Изучение надежности технологического оборудования требует разработки моделей сложных элементов техники (рисунок 1). Использование численных методов анализа сложных узлов требует разбивки их на конечные элементы, при этом размер сетки элементов зависит от размеров деталей машины.

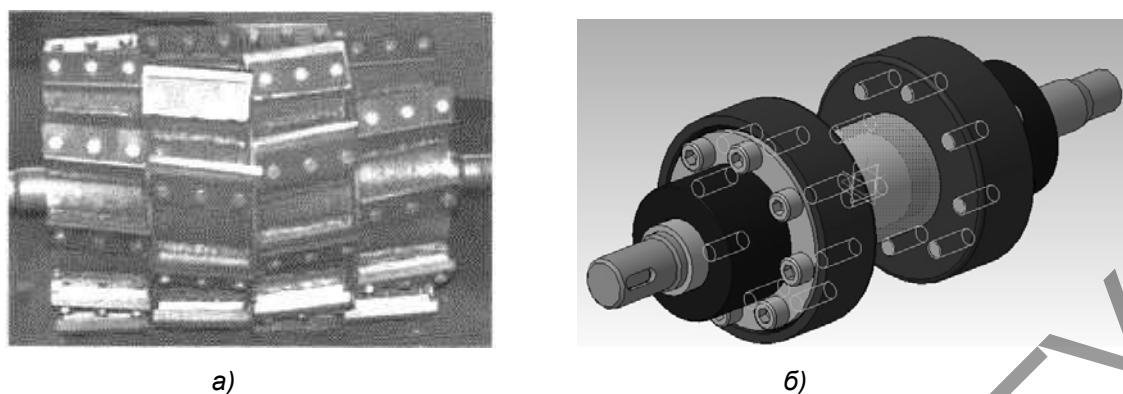


Рисунок 1. — Конструкция барабана (а) и 3D-модель вала барабана с подшипниковыми опорами (б)

Если в конструкцию машины входят подшипники, то их тела качения разделяются на элементы малых размеров, что приводит к росту количества уравнений системы. В результате возникают определенные сложности с достижением необходимой точности исследования сложных узлов машин.

Для изучения особенностей распределения нагрузки в узлах машин требуется решение следующих задач: 1) разработать оптимальную модель узла; 2) разработать модельный узел, заменяющий подшипники качения.

Целью работы является создание эквивалентной компьютерной модели опоры, заменяющей подшипники качения.

**Методика исследования.** Анализ научных данных [11—13] показал, что решение задачи по моделированию работы подшипника качения сводится к рассмотрению работы подшипника с соединением его деталей без зазора, с зазором и с натягом. Условия нагружения — радиальная вертикальная сила, действующая на наружное кольцо.

Задача математического моделирования решалась численным методом в программном комплексе конечно-элементного анализа SolidWorks. Компьютерная трехмерная геометрическая модель объекта исследования, построенная на основе конструктивных параметров подшипника, приведена на рисунке 1, б.

При создании математической модели контакта деталей подшипника были сделаны следующие основные допущения: 1) зазор в зоне контакта исключен; 2) с целью моделирования сепаратора, обеспечивающего ограничение взаимного перемещения тел качения, была создана жесткая связь, соединяющая тела качения и имеющая в месте соединения с каждым телом три вращательные степени свободы относительно оси, параллельной оси симметрии подшипника.

В качестве материала взаимодействующих тел принималась сталь ШХ15 ГОСТ801-78; для которой модуль Юнга  $2 \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона 0,3. При создании на основе геометрической модели конечно-элементной модели для выделенных околоконтактных объемов исследуемых тел назначался размер элементов величиной 100 мкм (на основании ранее проведенного численного моделирования и сопоставления с результатами аналитического решения), для остальных областей — 1 мм. При создании конечно-элементной модели применялся алгоритм с преобладающим использованием элементов гексагональной формы второго порядка. Созданные конечно-элементные модели приведены на рисунке 2. Условия контактного взаимодействия задавались между поверхностями контактирующих тел и дорожками качения. Для расчета условий контактного взаимодействия использовался уточненный алгоритм Лагранжа. Задавалось несимметричное поведение контактирующих поверхностей, в качестве целевой использовались поверхности дорожек качения, а контактной — тела качения.

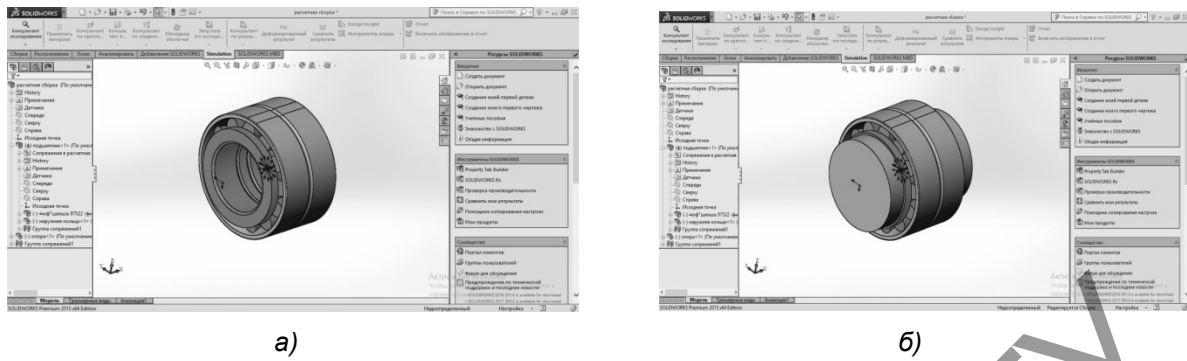


Рисунок 2. — Расчетная схема для определения перемещений в SolidWorks: двухрядный радиальный подшипник (а); сборка подшипниковой опоры (б)

С целью исключения погрешностей компьютерного решения задавалось автоматическое соприкосновение поверхностей деталей. В качестве граничных условий назначалось ограничение перемещений по всем степеням свободы вала. Для упрощения расчетов и анализа полученных результатов действие осевой нагрузки исключали. Действующая радиальная статическая нагрузка прикладывалась к поверхности наружного кольца. Затем прикладывалась силовая нагрузка к заранее выделенной площадке, численное значение которой составляло 1 000 и 10 000 Н.

**Анализ результатов моделирования.** В результате проведения численных расчетов были получены картины, отображающие напряжение, перемещение и деформации. Увеличение нагрузки в 10 раз позволило установить, что характер распределения деформаций (рисунки 3, а, и 4, а), напряжений (см. рисунки 3, б, и 4, б) и перемещений (см. рисунки 3, в, и 4, в) изменился незначительно.

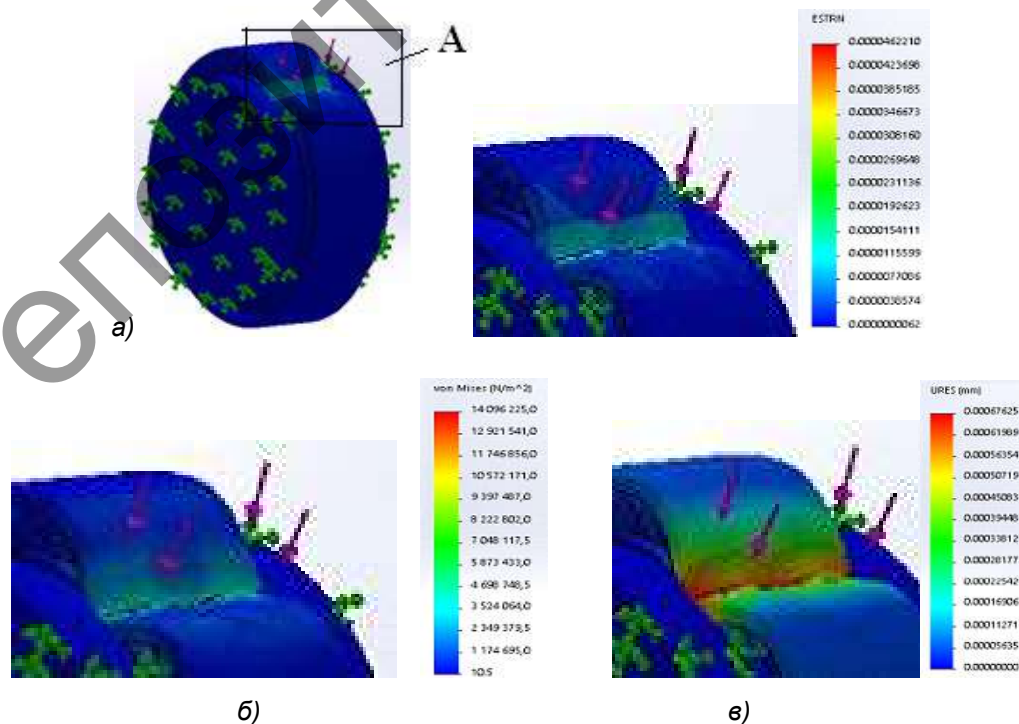
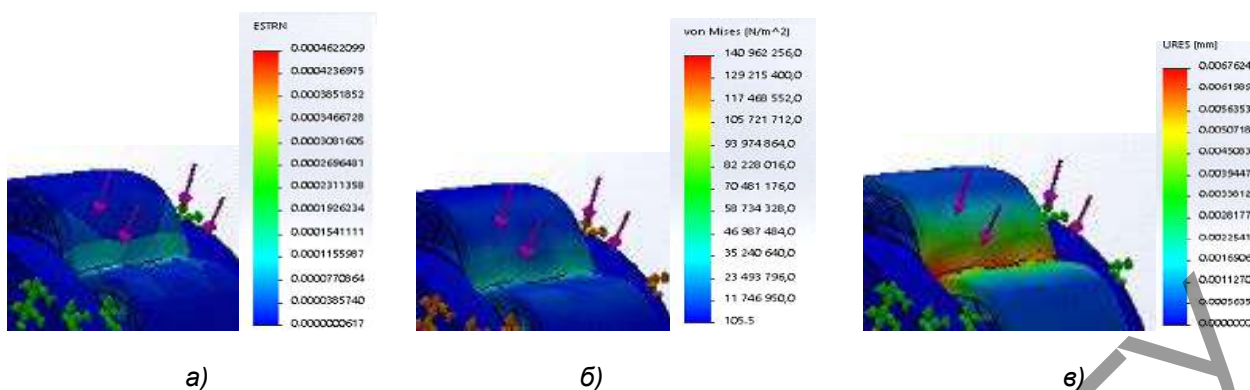


Рисунок 3. — Картины распределения деформаций (а), напряжений (б) и перемещений (в) при нагрузке подшипниковой опоры 1 000 Н

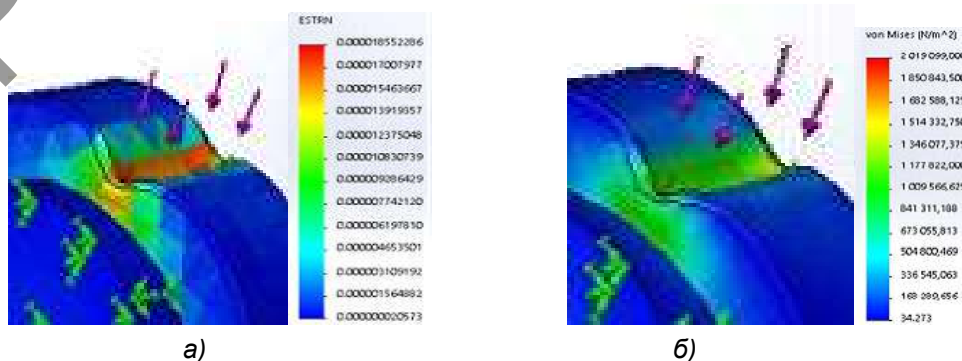


**Рисунок 4. — Картины распределения деформаций (а), напряжений (б) и перемещений (в) при нагрузке подшипниковой опоры 10 000 Н**

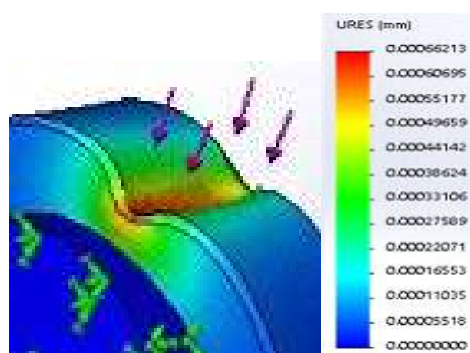
Затем были проведены серии расчетов с модельными опорами вместо подшипника. В результате расчетов установлено, что при постоянных геометрических параметрах исследуемой модели, оптимальным материалом модельной опоры является серое литое железо, обладающее следующими физико-механическими свойствами:

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	66178,1	Н / мм <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	0,27	Не применимо
Модуль сдвига	50 000	Н / мм <sup>2</sup>
Массовая плотность	7 200	кг / м <sup>3</sup>
Предел прочности при растяжении	151,66	Н / мм <sup>2</sup>
Предел прочности при сжатии	572,16	Н / мм <sup>2</sup>
Предел текучести		Н / мм <sup>2</sup>
Коэффициент теплового расширения	$1,2e \cdot 10^5$	/К
Теплопроводность	45	Вт / (м · К)
Удельная теплоемкость	510	Д / (кг · К)
Коэффициент демпфирования материала		Не применимо

Рассмотрим результаты расчетов напряженно-деформированного состояния (рисунки 5 и 6). В результате расчетов установлено, что максимальные перемещения модельной опоры под действием силы 1 000 Н составляют  $6,6213 \cdot 10^{-4}$  мм, при той же нагрузке максимальные перемещения в подшипнике составили  $6,7625 \cdot 10^{-4}$  мм. При нагрузке в 10 000 Н максимальные перемещения в модельной опоре составили  $6,62125 \cdot 10^{-3}$  мм, в подшипнике —  $6,76247 \cdot 10^{-3}$  мм.

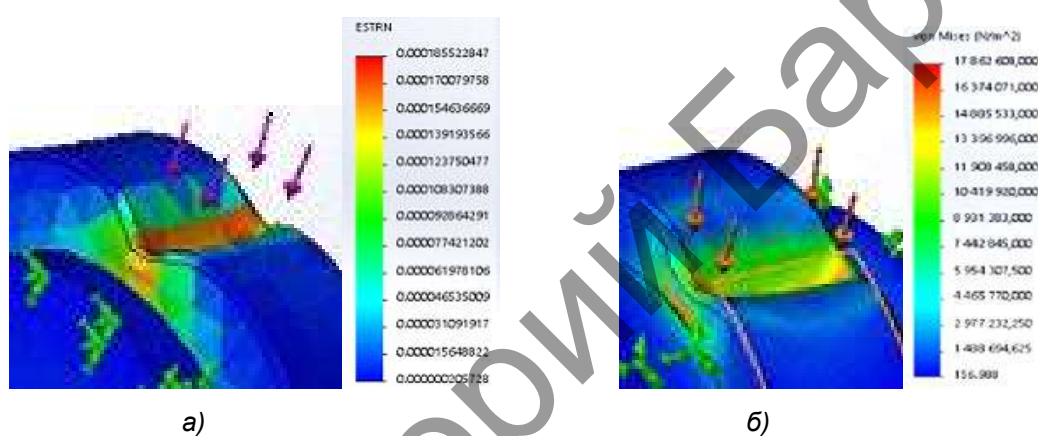


**Рисунок 5. — Картины распределения деформаций (а), напряжений (б) и перемещений (в) при нагрузке модельной опоры 1 000 Н**



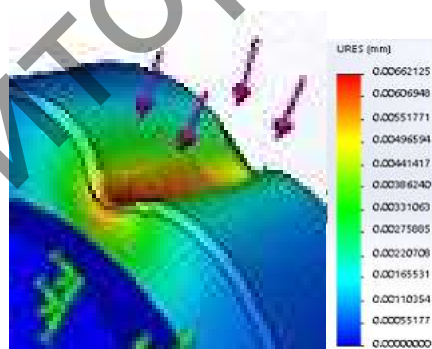
в)

Рисунок 5. — Продолжение



а)

б)



в)

Рисунок 6. — Картины распределения деформаций (а), напряжений (б) и перемещений (в) при нагрузке модельной опоры 10 000 Н

Кроме этого, для дополнительного анализа полученных результатов использовались коэффициенты соответствия

$$K_{ij} = \frac{\sigma_p}{\sigma_m}; K_{ij} = \frac{\delta_p}{\delta_m}; K_{ij} = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_m},$$

где  $\sigma_p$ ,  $\sigma_m$ ,  $\delta_p$ ,  $\delta_m$ ,  $\varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_m$  — напряжения, перемещения и деформации подшипниковых и модельных опор соответственно.

$$K_{11} = 6,9517; K_{12} = 1,0213; K_{13} = 2,38; K_{21} = 7,891; K_{22} = 1,0213; K_{23} = 2,4914.$$

**Заключение.** Анализ данных, полученных путем математического моделирования, позволяет сделать вывод, что в процессе радиального нагружения подшипника качения его детали испытывают существенные напряжения различного рода; применение модельных опор позволяет упростить задачу при исследовании напряженно-деформированного состояния сложного узла барабана кормоуборочного комбайна; в качестве материала модельной опоры можно использовать серое литое железо.

#### Список цитируемых источников

1. *Bayer, G. Mechanical Wear Fundamentals and Testing / G. Bayer, G. Raimond.* — USA, New York : Marcel Dekker, 2004. — 396 p.
2. *Stachowiak, W. G. Engineering Tribology / W. G. Stachowiak, A. W. Bachelor.* — Munhen : Butterworth-Heinemann, 2001. — 765 p.
3. Трение, изнашивание и смазка / И. В. Крагельский [и др.] ; под общ. ред. В. В. Алисиной. — М. : Машиностроение, 1978. — 400 с.
4. *Горелов, А. А. Современные материалы и технологии в машиностроении / А. А. Горелов.* — М. : МИСиС, 2011. — 312 с.
5. *Попилов, Л. Я. Новые материалы в машиностроении / Л. Я. Попилов.* — М. : Машиностроение, 1967. — 427 с.
6. *Котов, С. Ю. Влияние вакуумно-плазменного упрочнения тел качения покрытием ZrN на долговечность подшипника / С. Ю. Котов, Г. Я. Беляев // Вести ЛГУ. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки.* — 2013. — № 11. — С. 38—43.
7. *Котов, С. Ю. Влияние вакуумно-плазменного упрочнения элементов качения на долговечность подшипника / С. Ю. Котов, Г. Я. Беляев // Наука и техника.* — 2014. — № 2. — С. 57—61.
8. *Котов, С. Ю. Влияние вакуумно-плазменного упрочнения элементов качения PVD покрытием ZrN на температуру подшипникового узла / С. Ю. Котов, Г. Я. Беляев // Вести ГрГУ.* — 2013. — № 4. — С. 102—105.
9. Минский подшипниковый завод. Каталог подшипников [Электронный ресурс] / Официальный сайт ОАО «Минский подшипниковый завод». — Минск, 2014. — Режим доступа: <http://mpz.com.by/catalog/bearings/bearing-catalogue/425/8506>. — Дата доступа: 30.01.2019.
10. Подшипники качения : справ. пособие / Н. А. Спицын [и др.] ; под общ. ред. Н. Ю. Благосклонова. — М. : Машгиз, 1961. — 828 с.
11. *Нарышкин, В. Н. Подшипники качения : справ.-каталог / В. Н. Нарышкин, Р. В. Коросташевский.* — М. : Машиностроение, 1984. — 280 с.
12. *Перель, Л. Я. Подшипники качения. Расчет, проектирование и обслуживание опор / Л. Я. Перель.* — М. : Машиностроение, 1983. — 543 с.
13. *Шмелев, А. В. Разработка математической модели взаимодействия элементов качения и кольца шарикового подшипника / А. В. Шмелев, С. Ю. Котов, Г. Я. Беляев // Вести Белорус.-Рос. ун-та.* — 2015. — № 4 (49). — С. 94—102.

Поступил в редакцию 17.05.2019