

Учреждение образования  
«Барановичский государственный университет»

## *Вестник БарГУ*

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 8, июнь, 2020.

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 технологии и оборудования машиностроения 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

Леон Ольга Вячеславовна, кандидат филологических наук, доцент кафедры теории и практики германских языков учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Богданович Ирина Аркадьевна (*ответственный за направление «Машиностроение и машиноведение»*), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и оборудования машиностроения 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, главный научный сотрудник государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Гавриленя Андрей Константинович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Девоино Олег Георгиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательский политехнический институт» (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 орден 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 орден 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).

Сиваченко Леонид Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспортных и технологических машин межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет» (Могилев, 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](mailto: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» включён в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам*

*Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включён 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* А. Ю. Сидоренко

*Технический редактор* Л. Н. Щербук

*Компьютерная вёрстка* С. М. Глушак

*Корректор* Н. Н. Колодко

Подписано в печать 16.06.2020. Формат 60 × 84<sup>1/8</sup>. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 16,00. Уч.-изд. л. 9,35. Тираж 100 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, 2020

Установа адукацыі  
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

## *Веснік БарДУ*

Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 8, чэрвень, 2020.

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 тэхналогіі і абсталявання машынабудавання 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

Леон Вольга Вячаславаўна, кандыдат філалагічных навук, дацэнт кафедры тэорыі і практыкі германскіх моў установы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Багдановіч Ірына Аркадзеўна (*адказы за напрамак «Машынабудаванне і машыназнаўства»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры тэхналогіі і абсталявання машынабудавання ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Дубень Ігар Віктаравіч (*адказы за напрамак «Працэсы і машыны аграінжынерных 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, галоўны навуковы супрацоўнік дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

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

Дзявойна Алег Георгіевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, загадчык Навукова-даследчай інавацыйнай лабараторыі плазменных і лазерных тэхналогій філіяла Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта «Навукова-даследчы палітэхнічны інстытут» (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).

Сівачэнка Леанід Аляксандравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры транспартных і тэхналагічных машын міждзяржаўнай адукацыйнай установы вышэйшай адукацыі «Беларуска-Расійскі ўніверсітэт» (Магілёў, Рэспубліка Беларусь).

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

Шлэг Валерыі 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* Г. Ю. Сідарэнка

*Тэхнічны рэдактар* Л. М. Шчарбук

*Камп'ютарная вёрстка* С. М. Глушак

*Карэктар* Н. М. Каладко

Падпісана да друку 16.06.2020. Фармат 60 × 84 1/8. Папера ксераксная. Друк лічбавы. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 16,00. Ул.-выд. арк. 9,35. Тыраж 100 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 Слоніў, Гродзенская вобл.

© БарДУ, 2020

Educational institution  
“Baranovichi State University”

*BarSU Herald*

**A quarterly scientific and practical journal**

Published since March 2013.

Volume 8, June, 2020.

Engineering Series

---

*Founder:* Educational Institution “Baranovichi State University”.

#### **EDITORIAL BOARD**

*Editor-in-Chief* Vasilii 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**

##### **Executive 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 at the Chair of Machine-Building Technology and Equipment, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

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

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

Olga V. Leon, Ph. D in Philological Science, Associate Professor at the Chair of Theory and Practice of Germanic Languages, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Iryna A. Bogdanovich (*in charge of the heading “Machine Building and Engineering Science”*), Ph. D of Technical Science, Associate Professor, Head of the Chair of Technology and Equipment of Mechanical Engineering, 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, Chief Researcher at the State Scientific Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, the Republic of Belarus).

Andrei K. Gavrilnya, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Chair of Technical Support of Agricultural Production and Agronomy of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, 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 branch of Belarusian National Technical University “Research Division” (Minsk, the Republic of Belarus).

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

Viktor S. Ivashko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at 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 at the Chair of Engineering Science and Automobile Technical Maintenance of “Yanka Kupala State University of Grodno” (Grodno, the Republic of Belarus).

Anatoly N. Kartashevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair of Tractors, Cars and Machines for Environmental Engineering 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 at 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).

Leonid A. Sivachenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Chair of Transport and Technological Machines, Interstate Higher Education Institution “Belarusian-Russian University” (Mogilev, 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](mailto: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 compliance with the order of the Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus from January 21, 2015 № 16 the scientific and practical journal “BarSU Herald. Engineering Series” is included into the List of scientific publications of the Republic of Belarus for publishing the results of theses research on engineering sciences (mechanical engineering and machines, processes and machines of agroengineering systems).*

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

*Publishing:* 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* A. Y. Sidorenko

*Technical editor* L. N. Scherbuk

*Desktop Publishing* S. M. Glushak

*Proofreader* N. N. Kolodko

Passed for printing 16.06.2020. Format 60 × 84 1/8. Xerox Paper. Digital printing. Font Times. Conv. pr. s. l. 16,00. Acc.-pub. s. l. 9,35. Circulation of 100 copies. Order

Free price.

Printing: Grodno Regional Printing Unitary Enterprise “Slonim Printing Establishment”. Certificate about state registration of publishers, manufacturers and distributors of printings № 1/203 from 07.03.2014, № 2 from 25.02.2014.

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

© BarSU, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<b>Алифанов А. В., Горецкий Г. П., Цуран В. В., Богданович И. А., Толкачева О. А.</b> Исследование влияния высокотемпературной термомеханической обработки на структуру и механические свойства сталей, применяемых для изготовления рубильных ножей . . . . .	10
<b>Борис Е. В.</b> Исследование статических боковых смещений ленты грузовой и порожняковой ветвей ленточного конвейера . . . . .	17
<b>Данилов В. А., Борис Е. В.</b> Повышение долговечности приводов машин и механизмов на основе применения профильных моментопередающих соединений . . . . .	25
<b>Данилов В. А., Селицкий А. Н.</b> Погрешность профилирования и качество синусоидальных цилиндрических поверхностей при ротационном точении эксцентрично установленным круглым резцом . . . . .	35
<b>Дьяченко О. В., Криуша С. М., Кардаполова М. А., Голубев В. С., Вегера И. И.</b> Лазерное модифицирование газотермических покрытий из нержавеющей сталей . . . . .	44
<b>Жигалов А. Н., Богдан Д. Д., Горавский И. А.</b> Исследования влияния аэродинамического звукового упрочнения на свойства твердых сплавов . . . . .	53
<b>Жигалов А. Н., Горавский И. А., Богдан Д. Д.</b> Оптимизация износа и ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента сплава В35, упрочненного аэродинамическим звуковым методом . . . . .	69
<b>Милюкова А. М., Алифанов А. В., Михлюк А. И., Горчанин А. И., Матяс А. Н.</b> Улучшение физико-механических свойств сталей для изготовления труб путем магнитно-импульсной обработки . . . . .	79
<b>Наливко О. И., Русан С. И., Сиваченко Л. А., Сиваченко Т. Л.</b> Исследования напряженно-деформационного состояния проволочного рабочего элемента измельчительной машины . . . . .	90
<b>Потапов В. А., Сиваченко Л. А.</b> Цепной агрегат с волновой рабочей камерой и адаптивным механизмом силового воздействия для переработки влажных сырьевых материалов . . . . .	98

### ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

<b>Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Войтович М. М.</b> Исследование износа протекторов всесезонных автомобильных шин для грузовых механических транспортных средств . . . . .	106
<b>Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Сергей А. И.</b> Исследование эксплуатационных свойств полусинтетических моторных масел, используемых в дизельных двигателях внутреннего сгорания . . . . .	111
<b>Филиппов А. И., Аутко А. А., Заяц Э. В., Чеботарев В. П., Дубень И. В.</b> Оборудование для дозирования и ленточного внесения удобрений к универсальному агрегату АУ-М1 . . . . .	119

## ЗМЕСТ

### МАШЫНАБУДАВАННЕ І МАШЫНАЗНАЎСТВА

<b>Аліфанаў А. В., Гарэцкі Г. П., Цуран У. У., Багдановіч І. А., Талкачова В. А.</b> Даследаванне ўплыву высокатэмпературнай тэрма механічнай апрацоўкі на структуру і механічныя ўласцівасці сталяў, якія прымяняюцца для вырабу рубільных нажоў . . . . .	10
<b>Борыс Я. В.</b> Даследаванне статычных бакавых зрушэнняў стужкі грузавых і парожніх галін стужачнага канвеера . . . . .	17
<b>Данілаў В. А., Борыс Я. В.</b> Павышэнне даўгавечнасці прывадаў машын і механізмаў на аснове прымянення профільных момантаперадаючых злучэнняў . . . . .	25
<b>Данілаў В. А., Сяліцкі А. М.</b> Хібнасць прафілявання і якасць сінусаідалных цыліндрычных паверхняў пры ратацыйным тачэнні эксцэнтрычна ўстаноўленым круглым разцом . . . . .	35
<b>Дз'ячэнка В. У., Крыуша С. М., Кардаполава М. А., Голубеў В. С., Вегера І. І.</b> Лазернае мадыфікаванне газатэрмічных пакрыццяў з нержавеючых сталяў . . . . .	44
<b>Жыгалаў А. М., Богдан Д. Д., Гараўскі І. А.</b> Даследаванні ўплыву аэрадынамічнага гукавога ўмацавання на ўласцівасці цвёрдых сплаваў . . . . .	44
<b>Жыгалаў А. М., Гараўскі І. А., Богдан Д. Д.</b> Аптымізацыя зношвання і рэсурсу металарэжучага цвёрдасплаўнага інструмента сплаву В35, умацаванага аэрадынамічным гукавым метадам . . . . .	69
<b>Мілюкова Г. М., Аліфанаў А. В., Міхлюк А. І., Гарчанін А. І., Мацяс А. М.</b> Паляпшэнне фізіка-механічных уласцівасцей сталяў для вырабу труб шляхам магнітна-імпульснай апрацоўкі . . . . .	79
<b>Наліўка А. І., Русан С. І., Сівачэнка Л. А., Сівачэнка Т. Л.</b> Даследаванне напружана-дэфармаванага стану драцянога рабочага элемента здрабняльнай машыны . . . . .	90
<b>Патапаў У. А., Сівачэнка Л. А.</b> Ланцуговы агрэгат з хвалевай рабочай камерай і адаптыўным механізмам сылавога ўздзеяння для перапрацоўкі вільготных сыравінных матэрыялаў . . . . .	98

### ПРАЦЭСЫ І МАШЫНЫ АГРАНЖЫНЕРНЫХ СІСТЭМ

<b>Піваварчык А. А., Гаўрыленя А. К., Вайтовіч М. М.</b> Даследаванне зношвання пратэктараў усесезонных аўтамабільных шин для грузавых механічных транспартных сродкаў . . . . .	106
<b>Піваварчык А. А., Гаўрыленя А. К., Сяргей А. І.</b> Даследаванне эксплуатацыйных уласцівасцей паўсінтэтычных маторных маслаў, выкарыстоўваемых у дызельных рухавіках унутранага згарання . . . . .	111
<b>Філіпаў А. І., Аутка А. А., Заяц Э. У., Чабатароў В. П., Дубень І. В.</b> Абсталяванне для дазіравання і стужачнага ўнясення ўгнаенняў да ўніверсальнага агрэгата АУ-М1 . . . . .	119

## CONTENTS

### MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

<b>Alifanov A. V., Goretsky G. P., Tsuran V. V., Bogdanovich I. A., Tolkacheva O. A.</b> The research of the influence of ausforming on the structure and mechanical properties of steels applied for manufacturing chipping knives .....	10
<b>Borys Ya.</b> The research of static lateral displacements of the belt track of the carrying and return belt conveyor lines .....	17
<b>Danilau V. A., Borys Ya.</b> Increasing the durability of machinery drives based on the application of profile torque-transmitting joints .....	25
<b>Danilau V. A., Sialitskiy A. N.</b> Profiling error and quality of sinusoidal cylindrical surfaces under rotary turning with an eccentric circular tool .....	35
<b>Dyachenko O. V., Kriusha S. M., Kardapolova M. A., Golubev V. S., Vegera I. I.</b> Laser modification of gas-thermal coatings from stainless steels .....	44
<b>Jigalov A. N., Bogdan D. D., Goravskii I. A.</b> The studies of the influence of aerodynamic sound hardening on the properties of hard alloys .....	53
<b>Jigalov A. N., Goravskii I. A., Bogdan D. D.</b> Optimization of the wear and resource of a metal-cutting carbide tool of B35 alloy strengthened by the aerodynamic sound method .....	69
<b>Milyukova A. M., Alifanov A. V., Mikhlyuk A. I., Gorchanin A. I., Matyas A. N.</b> The improvement of physical and mechanical properties of steels for manufacturing pipes by magnetic-pulse treatment .....	79
<b>Naliuko O. I., Rusan S. I., Sivachenko L. A., Sivachenko T. L.</b> The research of stress-strain state of a wire operating element of a grinding machine .....	90
<b>Potapov V. A., Sivachenko L. A.</b> A chain unit with a wave working chamber and adaptive mechanism of force influence for reprocessing humid raw materials .....	98

### PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

<b>Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Vaitovich M. M.</b> The research of the tread wear of all-season automobile tires for mechanical cargo vehicles .....	106
<b>Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Sergei A. I.</b> The study of performance attributes of semi-synthetic motor oils used in diesel internal combustion engines .....	111
<b>Filippov A. I., Autko A. A., Zayats E. V., Chebotarev V. P., Duben I. V.</b> The equipment for dosing and band fertilization to the AU-M1 universal unit .....	119

УДК 622.6

**Е. В. Борис**

Закрытое акционерное общество «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», ул. Козлова, 69, 223710 Солигорск, Республика Беларусь, +375 (33) 698 30 88, atp.even@yandex.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ БОКОВЫХ СМЕЩЕНИЙ ЛЕНТЫ ГРУЗОВОЙ И ПОРОЖНЯКОВОЙ ВЕТВЕЙ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Рассмотрено поведение грузовой и порожняковой ветвей ленточного конвейера при возникновении статических децентрирующих факторов. Исследовано боковое смещение ленты под действием децентрирующих факторов на линейной части жесткого и канатного ставов конвейера, не оборудованных центрирующими устройствами. Произведен сравнительный анализ различных типов роlikоопор. В зависимости от децентрирующего фактора были получены соответствующие коэффициенты центрирования. Даны рекомендации по применению различного типа роlikоопор с учетом их коэффициента центрирования.

**Ключевые слова:** лента; конвейер; сосредоточенная сила; распределенное усилие; став; смещение; ролики; роlikоопора.

Табл. 2. Библиогр.: 3 назв.

**Ya. V. Borys**

Closed Joint-Stock Company "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", 69 Kozlov St., 223710 Soligorsk, the Republic of Belarus, +375 (33) 698 30 88, atp.even@yandex.ru

## THE RESEARCH OF STATIC LATERAL DISPLACEMENTS OF THE BELT TRACK OF THE CARRYING AND RETURN BELT CONVEYOR LINES

The behavior of the carrying and return lines of the conveyor belt under the emergence of static decentralizing factors is considered. The lateral displacement of the belt track under the influence of decentralizing factors on the linear part of the rigid and rope conveyor flights, not equipped with centering devices, was examined. A comparative analysis of various types of roller supports is carried out. Corresponding centering coefficients were obtained depending on the decentering factor. Recommendations are given on the use of various types of rollers based on their centering coefficient.

**Keywords:** belt track; conveyor; concentrated force; distributed force; flight; displacement; rollers; roller support.

Table 2. Ref.: 3 titles.

**Введение.** При движении по роlikоопорам става конвейерная лента под действием различных сил отклоняется в сторону от своего центрального положения, возникает явление, которое в практике называют боковым сходом. Нецентральное движение ленты является в настоящее время одной из причин простоев конвейеров, появления просыпей в подконвейерном пространстве и заштыбовки става, уменьшения сроков службы ленты из-за износа бортов и пр. Все эти недостатки, связанные с боковым сходом ленты, снижают технико-экономические показатели конвейерного транспорта [1].

В процессе эксплуатации конвейера на ленту, движущуюся по линейной части, действуют боковые силы, которые вызваны следующими децентрирующими факторами: перекосом роlikоопор в горизонтальной и вертикальной плоскостях; отклонением става от оси конвейера; неодинаковым сопротивлением вращению боковых роlikов опоры; нецентральной загрузкой ленты; непрямолинейностью ленты в горизонтальной плоскости; несимметричным распределением натяжения по ширине ленты; неодинаковым натяжением канатов става.

Большинство децентрирующих факторов, за исключением непрямолинейности и нестационарной нецентральной загрузки ленты, сравнительно медленно изменяются в пространстве и во времени и могут рассматриваться как статические. Результатом их проявления являются децентрирующие ленту усилия и моменты, для определения которых рассматривается взаимодействие ленты и роlikоопоры.

**Основная часть.** При решении задач, связанных с определением величины бокового схода под действием статических сил, воспользуемся уравнением смещений ленты, которое запишется в виде

$$EI \frac{d^4\delta}{dx^4} - (S - \rho v^2) \frac{d^2\delta}{dx^2} - \rho a \frac{d\delta}{dx} + \rho b \delta = 0, \quad (1)$$

где  $EI$  — изгибная жесткость ленты;

$\delta$  — поперечное смещение ленты;

$x$  — продольная координата;

$S$  — натяжение ленты в зоне ее схода;

$\rho$  — масса 1 м длины ленты с грузом.

$v$  — скорость движения ленты;

$a$  — коэффициент интенсивности силы от перекоса ленты на роlikоопорах;

$b$  — коэффициент интенсивности восстанавливающих сил става;

Уравнение (1) может быть использовано как для грузовой, так и для порожняковой ветвей с введением соответствующих констант.

**Исследование боковых смещений ленты грузовой ветви конвейера.** Определим величину бокового схода ленты под действием децентрирующих факторов на линейной части жесткого и канатного ставов конвейеров, необорудованных центрирующими устройствами.

Под действием сосредоточенной децентрирующей силы  $F$ , возникающей при перекосе отдельной роlikоопоры, величина наибольшего схода ленты  $\delta_1$  определяется выражением

$$\delta_1 = \frac{F}{2\sqrt{\rho b} \sqrt{2\sqrt{\rho b EI} + S - \rho v^2}}. \quad (2)$$

Поскольку величина схода прямо пропорциональна силе  $F$ , то перекося роlikоопоры в горизонтальной плоскости приводит к смещениям ленты в 6...8 раз больше, чем такой же перекося в вертикальной плоскости. При повороте трехроlikовой опоры ( $\beta_1 = 30^\circ$ ,  $\beta_2 = 0$ ) в горизонтальной плоскости на угол 3...4° боковые смещения ленты шириной 1,2 м достигают 0,03 м. Из (2) следует, что наиболее рациональным способом увеличения центрирующей способности става является увеличение коэффициента интенсивности восстанавливающих сил  $b$  линейных опор. Зависимость коэффициента  $b$  от параметров трехроlikовой опоры имеет следующий вид [2]:

$$b = Qg \frac{\sin 2\beta_1}{\rho},$$

$$\text{где } Q = \frac{\rho_r(l-l') \cos \beta_1 \sin(\beta_1 + \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{\rho_l}{B},$$

где  $l$  — длина ролика;

$l'$  — длина незагруженной части ролика;

$\varphi$  — угол естественного откоса груза;

$\rho_l$  — масса 1 м ленты.

Максимальная величина  $b$  для углов естественного откоса  $10...20^\circ$  достигается при углах наклона боковых роликов  $30...35^\circ$ . Дополнительное увеличение  $b$  может быть достигнуто поворотом боковых роликов в плане. В этом случае

$$b = \frac{Qg}{\rho} [\sin 2\beta_1 + 2f_1(\beta_2)].$$

Поворот боковых роликов в плане на угол  $2...3^\circ$  увеличивает восстанавливающие силы в  $1,6...1,7$  раза. Подобная конструкция роликоопор линейной секции может быть рекомендована для конвейеров, эксплуатируемых в условиях, когда точная установка става затруднена. При использовании пятироликовых желобчатых опор интенсивность восстанавливающих усилий возрастает по сравнению с трехроликовыми в  $1,2...1,4$  раза за счет увеличения суммарной длины негоризонтально установленных роликов, а также большего наклона к горизонту крайних роликов.

На конвейерах с канатным ставом боковой сход ленты сопровождается дополнительным перекосом роликоопор в вертикальной плоскости, возникающим вследствие перераспределения веса ленты и груза между канатами. Интенсивность восстанавливающих сил при этом уменьшается на величину  $b'$ . При навеске между поддерживающими канатами четырех роликоопор  $b' = 3\rho g^2 \frac{l_p^2}{HB_c^2}$ , двух роликоопор  $b' = 1,5\rho g^2 \frac{l_p^2}{HB_c^2}$ .

Роликоопоры с шарнирным (в вертикальной плоскости) соединением роликов между собой и с канатами создают восстанавливающую силу, на  $10...20\%$  меньшую, чем жесткие. У роликоопор с шарнирным соединением роликов в вертикальной и горизонтальной плоскостях восстанавливающие силы на горизонтальных и уклонных конвейерах на  $20...25\%$  больше, чем у жестких роликоопор; на бремсберговых конвейерах применение данных роликоопор без специальных приспособлений, препятствующих уводу роликов лентой, недопустимо.

Для сравнения бокового схода ленты на роликоопорах различных конструкций введем коэффициент центрирования  $\rho_{ц}$ , равный отношению величины децентрирующей силы  $R_1$ , необходимой для бокового схода ленты на допустимую величину  $[\delta_1]$  на исследуемой конструкции става, к величине децентрирующей силы  $R_0$ , вызывающей сход ленты на величину  $[\delta_0]$  на ставе базовой конструкции:

$$\rho_{ц} = \frac{R_1}{R_0}.$$

За базовую примем жесткую конструкцию става с трехроликовыми опорами. Величина допустимого схода ленты на грузовой ветви определяется отсутствием просыпания груза и существенно зависит от угла наклона боковых роликов  $\beta_1$  и угла естественного откоса груза  $\varphi$ .

Существует зависимость величины допустимого бокового схода  $[\delta]$  от ширины незагруженной кромки ленты  $\Delta$  и углов  $\beta_1$ ,  $\varphi$ :

$$[\delta] = \frac{\Delta}{2} \left[ 1 + \sqrt{0,5 + 2 \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\beta_1} \left( 0,55 + \frac{0,2}{\cos\beta_1} - \frac{\Delta}{B} \right)} \right].$$

При увеличении угла  $\beta_1$  от  $30^\circ$  до  $45^\circ$  величина  $[\delta]$  уменьшается на 10...15 %. При действии сосредоточенной силы значения коэффициентов центрирования роlikоопор грузовой ветви горизонтального конвейера с параметрами  $B = 1,2$  м;  $S = 20$  кН;  $v = 3,15$  м / с приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 следует, что наибольшие значения коэффициента центрирования имеют жесткие трехроlikовые и пятироlikовые опоры с боковыми роliками, повернутыми в плане. Равенство значений коэффициента центрирования трехроlikовой и пятироlikовой опор объясняется тем, что хотя восстанавливающие силы на пятироlikовой опоре больше, но величина допустимого бокового схода ленты на ней будет меньше, чем на трехроlikовой.

При действии на ленту распределенного децентрирующего усилия, вызванного неодинаковым натяжением канатов или стационарной нецентральной загрузкой ленты, величину усилия можно считать постоянной вдоль става. Тогда на значительном удалении от концевых барабанов боковые смещения ленты также постоянны по величине, децентрирующее усилие уравнивается восстанавливающими силами линейных опор:

$$F_{3,4} = \rho b \delta$$

При допускаемой разнице провесов канатов 0,01 м боковые смещения ленты определяются выражением

$$\delta = \frac{0,01g \sum K_i \cos \beta_{1i}}{bB_c}$$

Величина боковых смещений ленты обратно пропорциональна интенсивности восстанавливающих сил и для трехроlikовых опор не превышает 0,015 м. Нецентральная нагрузка вызывает боковой сход ленты на величину, близкую смещению грузопотока сечением  $F_r$  относительно середины ленты:

$$\delta = \frac{\rho_r F_r}{\rho} \delta_r$$

Т а б л и ц а 1. — Значения коэффициентов центрирования роlikоопор грузовой ветви

Тип става	Тип роlikоопоры	Углы наклона роlikов	Коэффициент центрирования *
Жесткий	Жесткая трехроlikовая	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 0$	1 / 1
		$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 2^\circ$	1,3 / 1,3
	Жесткая пятироlikовая	$\beta_{11} = 22^\circ, \beta_{12} = 45^\circ, \beta_1 = \beta_2 = 0$	1,1 / 1,2
		$\beta_{11} = 22^\circ, \beta_{12} = 45^\circ, \beta_1 = \beta_2 = 2$	1,3 / 1,5
Канатный	Жесткая трехроlikовая	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 0$	0,9 / 0,9
	Трехроlikовая с шарнирным соединением роlikов в вертикальной плоскости	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 0$	0,8 / 0,8
	Трехроlikовая с универсальным шарнирным соединением роlikов	$\beta_1 = 30^\circ$	1,2 / 1,2

Примечание. \* В числителе значения при децентрирующем факторе — сосредоточенной силе, в знаменателе — сосредоточенном моменте.

Центрирующие свойства става не влияют на величину схода. Смещение грузопотока относительно ленты происходит вследствие бокового схода ленты в месте загрузки  $\delta_l$  и смещения самого грузопотока относительно продольной оси конвейера  $\delta_r$ .

Рассматривая эти причины отдельно, следует отметить, что вследствие смещений ленты в месте загрузки ширина ее незагруженной кромки  $\Delta$  уменьшается до величины  $\Delta - \delta_l \left(1 - \frac{\rho_l}{2\rho}\right)$  (на трехроликовых опорах), а при смещении грузопотока — до величины  $\Delta - \delta_r \left(1 - \frac{\rho_r F_r}{2\rho}\right)$  или  $\Delta - \delta_r \left(1 - \frac{\rho_r F_l}{2\rho}\right)$ .

Таким образом, отклонения поступающего грузопотока уменьшают ширину свободной кромки почти в 1,5 раза существеннее, чем отклонения ленты в месте загрузки.

Определим смещение ленты под действием сосредоточенного изгибающего момента  $M$ , возникающего при заклинивании в опоре бокового ролика. Решение уравнения (1) статических смещений ленты имеет следующий вид:

$$\delta = e^{-\eta_1 x} (C_1 \cos \eta_2 x + C_2 \sin \eta_2 x) + e^{\eta_1 x} (C_3 \cos \eta_2 x + C_4 \sin \eta_2 x),$$

где

$$\eta_1 = \left[ \left( \frac{\rho b}{4EI} \right)^{1/2} + \frac{S - \rho v^2}{4EI} \right]^{1/2},$$

$$\eta_2 = \left[ \left( \frac{\rho b}{4EI} \right)^{1/2} - \frac{S - \rho v^2}{4EI} \right]^{1/2}.$$

Пусть момент приложен в точке с координатой  $x = 0$ , тогда, учитывая кососимметричный характер смещений ленты, запишем граничные условия:

$$\begin{aligned} \delta(0) &= \delta(\infty) = 0, \\ \frac{d\delta}{dx}(\infty) &= 0, \\ \frac{d^2\delta}{dx^2}(0) &= \frac{M}{EI}. \end{aligned} \quad (3)$$

Определив из граничных условий постоянные  $C_{1-4}$ , запишем выражение для наибольших смещений ленты  $\delta_{\max}$ , имеющих место в точке  $x = \frac{1}{\eta_1} \operatorname{arctg} \frac{\eta_2}{\eta_1}$ :

$$\delta_{\max} = \frac{M}{2EI\eta_1^2 \sqrt{1 + \eta_2 / \eta_1}} e^{\frac{\eta_1 \operatorname{arctg} \frac{\eta_2}{\eta_1}}{\eta_2}}.$$

С увеличением восстанавливающих сил, натяжения и жесткости ленты боковые смещения уменьшаются. Значения коэффициентов центрирования для конвейера с параметрами  $B = 1200$  мм,  $S = 20$  кН,  $v = 3,15$  м/с приведены в таблице 1. У пятироликовых опор считаем заторможенным внутренний наклоненный ролик. Расчеты показывают, что на грузовой ветви современных типовых подземных конвейеров боковые смещения ленты, вызванные заклиниванием бокового ролика, не превышают 0,01 м.

**Исследование боковых смещений ленты порожняковой ветви конвейера.** Рассмотрим боковой сход ленты на порожняковой ветви, оснащенной одно-, двух- и трехроликовыми опорами, под действием сосредоточенной децентрирующей силы и момента [3].

Боковые смещения ленты на порожняковой ветви гораздо сильнее зависят от типа роликоопор, чем на грузовой. Так, на двухроликовых опорах с роликами, наклоненными к горизонту под углом  $10^\circ$ , сход ленты в 7 раз меньше, чем на однороликовых опорах. Допустимые смещения ленты определяются величиной зазора между бортом ленты и металлоконструкцией става  $\Delta_c$  и углом наклона роликов  $\beta_1$ :

$$[\delta] = \frac{\Delta_c}{\cos \beta_1}.$$

Величина наибольших смещений ленты на желобчатых опорах  $[\delta_2]$  определяется выражением

$$\delta_2 = \frac{F(a_1 - a_2)}{4\sqrt{\rho_{\text{л}} b_{\text{л}}} \sqrt{\frac{(S - \rho_{\text{л}} v^2)^2}{4EI} - \rho_{\text{л}} F b_{\text{л}}}},$$

где

$$a_{1,2} = \left\{ \frac{S - \rho_{\text{л}} v^2}{2EI} \pm \left[ \left( \frac{S - \rho_{\text{л}} v^2}{2EI} \right)^2 - \frac{\rho_{\text{л}} b_{\text{л}}}{EI} \right]^{1/2} \right\}^{1/2};$$

$b_{\text{л}}$  — интенсивность восстанавливающих сил на порожняковой ветви:

$$b_{\text{л}} = \frac{2\rho_{\text{л}} F_{\text{л}} g}{B} \sin \beta_1.$$

С увеличением наклона боковых роликов к горизонту смещения ленты существенно уменьшаются, однако угол наклона регламентирован не только допустимым углом перегиба ленты. Глубина желоба порожняковой ветви ограничена также условием опирания ленты на боковые ролики: при значительной глубине желоба жесткая многослойная лента не вписывается в роликоопору, а опирается на ролики краями, что недопустимо. Крепление роликоопор порожняковой ветви к канатам става, подвешенного к кровле, уменьшает коэффициент центрирования в 1,06...1,08 раза за счет податливости канатов. Для устранения этого явления роликоопоры целесообразно закреплять в местах подвески канатов. Значения коэффициентов центрирования при параметрах  $B = 1,4$  м,  $S = 10$  кН,  $v = 3,15$  м/с приведены в таблице 2.

При эксплуатации конвейеров с желобчатыми опорами возможны случаи, когда один из роликов опоры перестанет вращаться. Возникающие при этом боковые смещения ленты, описываемые уравнением (1) и граничными условиями (3), имеют следующий вид:

$$\delta = \frac{M}{EI(a_1^2 - a_2^2)} (e^{-a_1 x} - e^{-a_2 x}).$$

Т а б л и ц а 2. — Значения коэффициентов центрирования роlikоопор порожняковой ветви

Тип роlikоопоры	Углы наклона	Коэффициент центрирования *
Однороlikовая	—	1 / —
Двухроlikовая	$\beta_1 = 10^\circ, \beta_2 = 0$	7 / 1
	$\beta_1 = 10^\circ, \beta_2 = 2^\circ$	9 / 1,2
Трехроlikовая	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 0$	1,2 / 1,8
	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 2^\circ$	16 / 2,1

*Примечание.* \* В числителе значения при децентрирующем факторе — сосредоточенной силе, в знаменателе — сосредоточенном моменте.

Наибольшие смещения ленты  $\delta_{\max}$  имеют место в точке

$$x = \frac{1}{a_2 - a_1} \ln \frac{a_2}{a_1},$$

$$\delta_{\max} = \frac{M}{EI(a_1^2 - a_2^2)} \left[ \left( \frac{a_2}{a_1} \right)^{\frac{a_1}{a_1 - a_2}} - \left( \frac{a_2}{a_1} \right)^{\frac{a_2}{a_1 - a_2}} \right]. \quad (4)$$

Из (4) следует, что смещения ленты порожняковой ветви при заклинивании бокового ролика больше смещений грузовой ветви. Это связано с тем, что величины децентрирующих моментов имеют одинаковый порядок на обеих ветвях (так как расстояние между опорами порожняковой ветви вдвое больше, чем грузовой), а натяжение и восстанавливающие силы на порожняковой ветви меньше. При замене двухроlikовых опор трехроlikовыми на конвейере с параметрами  $B = 1,2$  м,  $l_p = 2,4$  м,  $S = 10$  кН величина момента уменьшается со 108 до 86 Н·м, а боковой сдвиг — с 0,04 до 0,02 м. Значения коэффициента центрирования при действии сосредоточенного момента приведены в таблице 2.

**Заключение.** Исследование бокового схода ленты грузовой ветви конвейера показало, что наиболее опасными статическими децентрирующими факторами, вызывающими наибольшие смещения ленты, являются перекося роlikоопор в горизонтальной плоскости и нецентральная загрузка ленты. Остальные децентрирующие факторы вызывают несущественные смещения ленты. Наиболее рациональной конструкцией роlikоопоры грузовой ветви является жесткая трехроlikовая опора с боковыми роliками, повернутыми в плане на угол  $2 \dots 2,5^\circ$ .

При меньшей стоимости по сравнению с пятироlikовой опорой она имеет ту же величину коэффициента центрирования. Поскольку повышение центрирующих свойств става не уменьшает бокового схода, вызванного нецентральной загрузкой, то рациональным способом уменьшения смещений ленты является центральная установка загрузочных устройств и центрирование ленты в местах загрузки.

Наиболее опасным децентрирующим фактором на порожняковой ветви конвейера является перекося роликоспор в горизонтальной плоскости. Для устранения перекося и регулировки хода ленты в конструкции става и опор должно быть предусмотрено плавное регулирование положения роликоспор в горизонтальной плоскости. Наиболее рациональной конструкцией роликоспоры порожняковой ветви является унифицированная трехроликосвая опора с роликами, повернутыми в плане на  $2...2,5^\circ$ .

#### Список цитируемых источников

1. *Захаров, Ю. Н.* Ленточные конвейеры горной промышленности: исследования и проектирование : монография / Ю. Н. Захаров. — Гродно : ГГАУ, 2013. — 417 с.
2. *Шахмейстер, Л. Г.* Теория и расчет ленточных конвейеров / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев. — М. : Машиностроение, 1978. — 392 с.
3. Ленточные конвейера в горной промышленности / В. А. Дьяков [и др.] — М. : Недра, 1982. — 349 с.

Поступила в редакцию 05.05.2020