

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 .

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 × 84¹/₈. 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.

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 ксерасная. 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.

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

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

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

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

ЗМЕСТ

МАШЫНАБУДАВАННЕ І МАШЫНАЗНАЎСТВА

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

ПРАЦЭСЫ І МАШЫНЫ АГРАНЖЫНЕРНЫХ СІСТЭМ

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

CONTENTS

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

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

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

УДК 621.926

А. І. Наліўка¹, С. І. Русан¹, Л. А. Сівачэнка², Т. Л. Сівачэнка³¹Установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт», Міністэрства адукацыі Рэспублікі Беларусь, вул. Войкава, 21, 225404 Баранавічы, Рэспубліка Беларусь, +375 (33) 699 45 01, alehnaliuko@mail.ru²Міждзяржаўная адукацыйная ўстанова вышэйшай адукацыі «Беларуска-Расійскі ўніверсітэт», Міністэрства адукацыі Рэспублікі Беларусь, праспект Міру 43, 212000 Магілёў, Рэспубліка Беларусь, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru³Унітарнае прыватнае вытворчае прадпрыемства «КБ «Прамысловыя тэхналогіі і комплексы»», вул. Грушаўская, д. 32, 212003 Магілёў, +375 (44) 453 88 08, tatsianamail.86@gmail.com

ДАСЛЕДАВАННЕ НАПРУЖАНА-ДЭФАРМАВАНАГА СТАНУ ДРАЦЯНОГА РАБОЧАГА ЭЛЕМЕНТА ЗДРАБНЯЛЬНАЙ МАШЫНЫ

Выкладзена метадыка даследавання напружана-дэфармаванага стану драцяных элементаў ротара здрабняльнай машыны. Улічаны як сілы інерцыі, так і сілы цяжару. Паказана, што апошнія можна ігнараваць.

Апісана метадыка вызначэння сілы ўзаемадзеяння драцянога элемента ротара здрабняльнай машыны з часціцай здрабняемага матэрыялу. Рабочы элемент ротара мадэлюецца пругкім стрыжнем, а часціца — матэрыяльным пунктам.

Ключавыя словы: метадыка; стрыжань; здрабненне; вуглавая хуткасць; цэнтрабежнае паскарэнне; перамяшчэнне; драцяны элемент; здрабняльная машына.

Рис. 7. Бібліягр.: 6 назваў.

O. I. Naliuko¹, S. I. Rusan¹, L. A. Sivachenko², T. L. Sivachenko³¹Educational Institution "Baranovichi State University", Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykov St., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (33) 699 45 01, alehnaliuko@mail.ru²Belarusian-Russian University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, Mira Avenue 43, 212000 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru³Deputy Director Private Production Unitary Enterprise "DB «Industrial technologies and complexes»" 32 Grushevskaya Str., 212003 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (44) 453 88 08, tatsianamail.86@gmail.com

THE RESEARCH OF STRESS-STRAIN STATE OF A WIRE OPERATING ELEMENT OF A GRINDING MACHINE

The methodology for studying the stress-strain state of the wire elements of the rotor of a grinding machine is described. Both inertial forces and gravity are taken into account. It is shown that the latter can be neglected.

The technique is described for determining the interaction force of the wire element of the rotor of a grinding machine with a particle of ground material. The operating element of the rotor is modeled by an elastic rod, and the particle is modeled by a material point.

Keywords: technique; rod; grinding; angular velocity; centripetal acceleration; movement; wire element; grinding machine.

Fig. 7. Ref.: 6 titles.

Уводзіны. Неабходнасць даследавання напружана-дэфармаванага стану стрыжня ўзнікае ў сувязі з распрацоўкай перспектывных здрабняльных машын, асноўным звяном якіх з'яўляецца ратар з замацаванымі на яго знешняй паверхні радыяльнымі драцянымі элементамі ў выглядзе шчоткі. Кожны такі элемент разглядаецца як стрыжань, што знаходзіцца пад уздзеяннем цэнтрабежных сіл (сіл інерцыі) і сіл цяжару. На першым этапе даследавання не ўлічваем дадатковыя сілы ўзаемадзеяння са здрабняемым рэчывам, што ўзнікаюць у рабочай зоне машыны. Канструкцыя здрабняльнай машыны апісанага тыпу, некаторыя параметры і разлікі іх рабочых органаў выкладзены ў шэрагу публікацый [1—3].

Асноўная частка. На рысунку 1, *a*, драцяны элемент *AB* замацаваны на паверхні дыска радыуса r_0 , які верціцца з пастаяннай вуглавой хуткасцю ω вакол восі *O*.

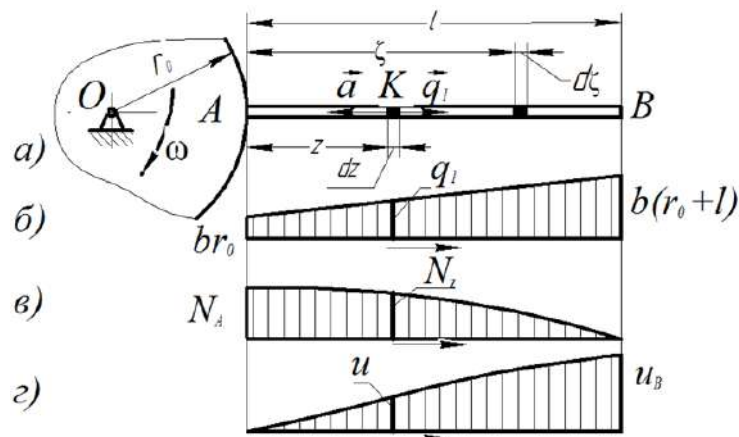


Рисунок 1. — Разліковая схема ротара здрабняльнай машыны: драцяны элемент AB пад дзеяннем адцэнтрабежных сіл q_i (а); эпіюра адцэнтрабежных сіл (б); эпіюра нармальных сіл (в); эпіюра перамяшчэнняў (г)

Далей элемент будзем разглядаць як стрыжань, які пры $\omega = \text{const}$ па-за мяжой рабочей зоны здрабняльнай машыны працуе на расцяжэнне і згін. Даўжыню стрыжня, яго дыяметр і масу абазначаем адпаведна літарамі l , d і $m_{\text{ст}}$. Пагонная маса вылічваецца па формуле $m = m_{\text{ст}}/l$. Разгледзім элементарны ўчастак стрыжня даўжынёй $d\zeta$ на адлегласці ζ ад замацоўкі A . Яго маса роўна $md\zeta$, а паскарэнне $a = r\omega^2$, дзе $r = r_0 + \zeta$; тады $a = (r_0 + \zeta)\omega^2$. Сіла інерцыі ўчастка $d\zeta$ роўна: $q_i = mad\zeta$, ці

$$q_i = (br_0 + b\zeta)d\zeta, \quad (1)$$

дзе $b = m\omega^2$. З улікам формулы (1) раўнадзейная сіла інерцыі стрыжня Q_i роўна:

$$Q_i = b \int_0^l (r_0 + \zeta)d\zeta = b(r_0\zeta + \zeta^2/2) \Big|_0^l = b(r_0l + l^2/2) = b(r_0 + l/2) = (r_0 + l/2)m_{\text{ст}}\omega^2.$$

Знойдзем нармальную сілу N_z у адвольным сячэнні стрыжня K , зададзенай каардынатай z . Яна роўна суме сіл q_i , што дзейнічаюць злева ад сячэння K , г. зн. на ўчастак KB :

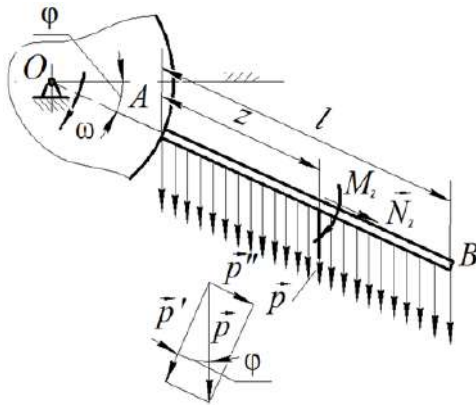
$$N_z = \int_z^l q_i = \int_z^l (br_0 + b\zeta)d\zeta = b \int_z^l (r_0 + \zeta)d\zeta = b(r_0\zeta + \zeta^2/2) \Big|_z^l.$$

Канчаткова

$$N_z = b \left[r_0(l - z) + (l^2 - z^2)/2 \right]. \quad (2)$$

Максімальная нармальная сіла мае месца ў замацоўцы A пры $z = 0$:

$$N_{\text{max}} = N_A = (r_0 + l/2)m_{\text{ст}}\omega^2. \quad (3)$$



Рисунак 2. — Драцяны элемент AB пад дзеяннем сіл цяжару

Як бачым, $N_{\max} = Q_i$. Сіла цяжару P стрыжня раўнамерна размеркавана па яго даўжыні l , таму ўтварае пагонную назрузку пастаяннай інтэнсіўнасці $p = P / l$. Яе напрамак адносна стрыжня змяняецца пры яго павароце. На рысунку 2 стрыжань AB павёрнуты адносна гарызанталі на вугал φ . Разгледзім элемент стрыжня адзінкавай даўжыні, што знаходзіцца на адлегласці z ад замацоўкі A . Яго маса $m = m_{\text{ст}} / l$, а сіла цяжару $p = mg$ ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — паскарэнне свабоднага падзення). Раскладзём вектар p на кампаненты p' і p'' папярэк і ўздоўж восі стрыжня (гл. рысунка 2): $p' = p \cos \varphi$, $p'' = p \sin \varphi$. Раўнадзейная на грузкі p'' , якая прыкладзена да ўчастка KB , утварае нармальную сілу N_K у сячэнні з каардынатай $z = AK$: $N_K = (l - z) p''$, ці

$$N_K = (l - z) mg \sin \varphi. \quad (4)$$

Раўнадзейная на грузкі p' на участку KB роўна $(l - z)p'$; яе здабытак на плячо $KB / 2$ стварае выгінальны момант у сячэнні K : $M_Z = (l - z)^2 p' / 2$. Найбольшага значэння момант M_Z дасягае ў сячэнні $z = 0$:

$$M_{\max} = M_A = l^2 p \cos \varphi / 2. \quad (5)$$

Пераходзім да вызначэння перамяшчэнняў u сячэнняў стрыжня. Інфармацыя пра іх велічыні неабходна для рэгулявання зазору паміж ротарам з драцянымі элементамі і рухомай (для настройкі) шчакой, па цыліндрычнай паверхні якой слізгаюць здрабняемыя фракцыі. Аналізуючы рысунка 3, можна заўважыць, што перамяшчэнне адвольнага сячэння K стрыжня AB роўна падаўжэнню яго ўчастка AK . Апошняе вызначым на падставе закона Гука. Для гэтага на участку AK на адлегласці ζ ад замацоўкі A выдзелім элемент $d\zeta$. Яго падаўжэнне пад дзеяннем нармальнай сілы N_ζ роўна: $\Delta(d\zeta) = N_\zeta d\zeta / EF$, дзе E — модуль пругкасці матэрыялу; F — плошча папярочнага сячэння; EF — жорсткасць стрыжня пры расцяжэнні/сцісканні.

Сілу N_ζ прымаем паводле формулы (2) пры $z = \zeta$. Падаўжэнне ўсяго ўчастка $AK = z$ роўна:

$$u = \int_0^z N_\zeta d\zeta / EF = (b / EF) \int_0^z [(r_0 + l / 2)l - r_0 \zeta - \zeta^2 / 2] d\zeta = (b / EF) [(r_0 + l / 2)l \zeta - r_0 \zeta^2 / 2 - \zeta^3 / 6] \Big|_0^z.$$

Канчаткова

$$u = [(r_0 + l / 2)lz - r_0 z^2 - z^3 / 6] m_{\text{ст}} \omega^2 / EF. \quad (6)$$

Падаўжэнне стрыжня, роўнае перамяшчэнню u_B яго канца B , знаходім па формуле (6) пры $z = l$:

$$u_B = (3r_0 + 2l) l m_{\text{ст}} \omega^2 / 6EF. \quad (7)$$

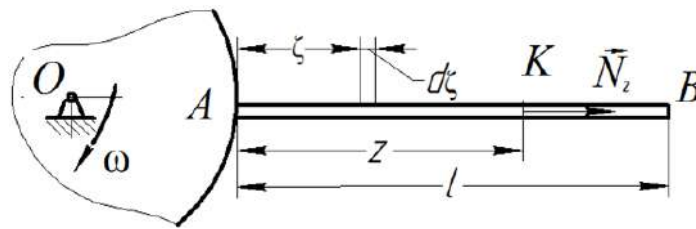


Рисунок 3. — Схема для вылічэння перамяшчэння u і сячэння стрыжня

Як бачым, падаўжэнне стрыжня u_B прапарцыянальна яго масе, квадрату даўжыні l і вуглавой хуткасці ω . Эпюры q_i , N_z і u прадстаўлены на рысунку 1 (б, з).

Перамяшчэнні сячэнняў стрыжня пад дзеяннем сілы цяжару вылічваюцца аналагічна. Нармальнае сіла прымаецца паводле формулы (4). Атрыманы вынік з улікам знакаў сумуецца з папярэднім.

Разгледзім далей метадыку вызначэння механічных напружанняў. У адвольным сячэнні стрыжня (гл. рысунак 3) нармальнае напружанне вылічваецца па формуле: $\sigma_z = N_z / F$, дзе N_z прымаецца па формуле (2); $F = \pi d^2 / 4$ — плошча папярочнага сячэння стрыжня. Самым напружаным сячэннем стрыжня з'яўляецца яго замацоўка A :

$$\sigma_A = 4(r_0 + l/2)m_{\text{ст}}\omega^2 / \pi d^2. \quad (8)$$

Тут улічана толькі сіла інерцыі $Q_i = N_A$ (3). Другая складаная напружанняў вызначаецца на падставе формулы (4) пры $z = 0$. І трэцяя кампанента ўзнікае пад дзеяннем выгінальнага моманту (5). Яна пераменная па вышыні сячэння стрыжня. Найбольшае значэнне велічыні знаходзіцца па формуле $\sigma_{A''} = M_A / w$, дзе $w = \pi d^3 / 32$ — момант супраціўлення. Заўважым, што пераменныя ў часе напружання $\sigma_{A'}$, $\sigma_{A''}$, выкліканыя сіламі цяжару, суадносяцца па велічыні з напружаннем σ_A , як сіла цяжару $P = m_{\text{ст}}g$ стрыжня з яго сілай інерцыі $Q_i = m_{\text{ст}}a_c$ ці як паскарэнні g і $a_c = r_0\omega^2$. Аналіз паскарэння паказвае, што $g \ll a_c$. Гэта дазваляе, з улікам рэальных значэнняў ω , не ўлічваць напружання $\sigma_{A'}$, $\sigma_{A''}$ пры даследаванні напружана-дэфармаванага стану элемента AB . Разам з тым невялікія па значэннях $\sigma_{A'}$, $\sigma_{A''}$ могуць уяўляць пэўную небяспеку для трываласці стрыжняў, бо, у адрозненне ад статычных напружанняў σ_A , з'яўляюцца цыклічнымі (дынамічнымі) — змяняюцца па велічыні і знаку паводле гарманічных законаў. Пры гэтым колькасць цыклаў у хвіліну роўна частаце вярчэння ротара. А цыклічныя нагрукі, як вядома з курсаў супраціўлення матэрыялаў [4], выклікаюць стамляемасць і разбурэнне матэрыялу.

На рысунку 4 схематычна паказаны фрагмент ротара з замацаваным на яго паверхні элементам AB шчоткі. Ротар верціцца з вуглавой хуткасцю ω вакол восі O . Элемент AB , рухаючыся на вялікай хуткасці, наносіць удар па нерухомай часцінцы D , што знаходзіцца на паверхні S , і здрабняе яе (або сцірае ў парашок). Цыліндрычная паверхня S таксама можа быць сканструявана ў выглядзе шчоткі з кароткіх дроцікаў. У нашай разліковай схеме драцяны элемент мадэліруецца пругкім стрыжнем (кансоллю), жорстка замацаваным канцом A на дыску, а часцінка D разглядаецца як матэрыяльная кропка (пункт). Для зручнасці

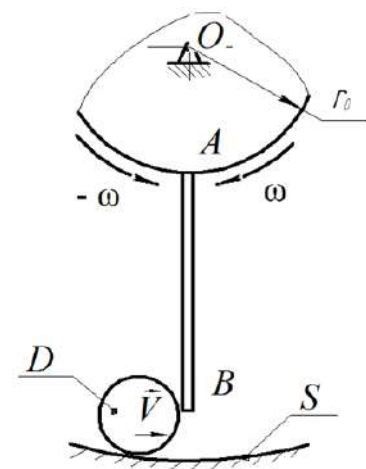


Рисунок 4. — Фрагмент ротара з ударным драцяным элементам AB

вывучэння ўзаемадзеяння кансолі AB з цэлам D прыменім вядомы з тэорыі механізмаў і машын метада адваротнага руху (ці метада спынення). Для гэтага ўсёй механічнай сістэме разам з паверхняй S надаём уяўнае адваротнае вярчэнне з вуглавой хуткасцю $(-\omega)$. Тады ротар з элементам AB «спыняецца», а часцінка D будзе рухацца з хуткасцю V , роўнай першапачатковай хуткасці канца B кансолі: $V = V_B = (r_0 + l)\omega$, дзе l — даўжыня кансолі. Далей пры вывадах формул выкарыстоўваюцца крыніцы [4—6].

Даследуем пругкія ўласцівасці кансольнага стрыжня пад дзеяннем засяроджанай сілы P на яго канцы. Павернем стрыжань у гарызантальнае становішча, як паказана на рысунку 5. Пачатак каардынат сумяшчаем з пунктам A . Вось Ax перпендыкулярна да плоскасці рысунка. Дэфармацыі выгіну кансолі лічым малымі. Тады ўраўненне яе пругкай лініі (сагнутай восі) запісваецца ў выглядзе

$$y'' = M / EJ_x. \quad (9)$$

Тут штрыхамі над літарай y абазначана другая вытворная па каардынаце z ; $M = P(l - z)$ — момант сілы P адносна адвольнага пункта K ; J_x — восевы момант інерцыі сячэння стрыжня; EJ_x — жорсткасць стрыжня пры выгіне. Перапішам ураўненне (9) у выглядзе $y'' = c_0(l - z)$, ці $d(y') / dz = c_0(l - z)$.

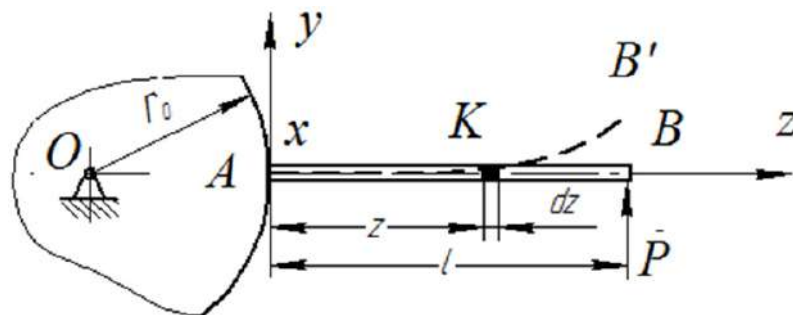
Адсюль

$$d(y') = c_0(l - z) dz \text{ і } y' = c_0 \int (l - z) dz = c_0(lz - z^2 / 2 + C_1),$$

дзе $c_0 = P / EJ_x$. Аналагічна вызначаем $y = c_0(lz^2 / 2 - z^3 / 6 + C_1z + C_2)$. Далей улічваем пачатковыя ўмовы ў замацоўцы A : пры $z = 0$, $y = 0$, $y' = 0$. Падстаўляючы іх у запісаныя вышэй роўнасці, знаходзім: $C_1 = C_2 = 0$. Атрымаем ураўненне сагнутай восі (на рысунку 5 яна паказана пункцірам):

$$y = c_0(lz^2 / 2 - z^3 / 6). \quad (10)$$

Найбольшае перамяшчэнне атрымліваем для канца B стрыжня пры $z = l$: $y_{\max} = Pl^3 / 3EJ_x$. Адсюль паводле азначэння пры $y_{\max} = 1$ знаходзім жорсткасць кансолі, нагружанай засяроджанай сілай на канцы B : $c = P = 3EJ_x / l^3$.



Рысунк 5. — Пругкі стрыжань (кансоль) пад дзеяннем сілы P

Уявім далей, што сіла ўзнікла падчас удару па канцу кансолі цела D масы m_D , якое ў момант удару мела хуткасць $V = V_B$. Дапускаем, што пружкая лінія кансолі, паварочваючыся пад уздзеяннем цела D , захоўвае значэнні формулы (9). Устанавім, з якой хуткасцю рухаецца адвольны пункт K кансолі. Улічваем, што хуткасці яе пунктаў прапарцыянальны іх перамяшчэнням y . Атрымліваем $V_K / y_K = V_B / y_B$; адсюль $V_K = (V_B / y_B) y_K$, дзе $y_B = y_{\max}$; y_K вызначаем па формуле (10) пры $z = z_K$. Тады

$$V_K = (3V_B / l^3)(lz_K^2 / 2 - z_K^3 / 6). \quad (11)$$

Вызначым кінетычную энергію dT элемента dz кансолі, якому адпавядае хуткасць V_K . Абзначым спалучэнне $(3V / l^3)$ праз c_1 , а масу стрыжня — як m_{ct} ; яго пагонная маса m вызначаецца па формуле $m = m_{ct} / l$. Маса m_z элемента dz роўна: $m_z = mdz$. Атрымліваем $dT = m_z V_K^2 / 2$. Кінетычная энергія ўсёй кансолі з улікам выразу (11) роўна:

$$\begin{aligned} T &= \int_0^l dT = (m_{ct} c_1^2 / 2l) \int_0^l (lz_K^2 / 2 - z_K^3 / 6) dz_K = c_2 \int_0^l (l^2 z_K^4 / 4 - z_K^5 / 6 + z_K^6 / 36) dz_K = \\ &= c_2 (l^2 z_K^5 / 20 - lz_K^6 / 36 + z_K^7 / 252) \Big|_0^l = c_2 (l^7 / 20 - l^7 / 36 + l^7 / 252), \end{aligned}$$

дзе $c_2 = m_{ct} c_1^2 / 2l = 9m_{ct} V_B^2 / 2l^7$.

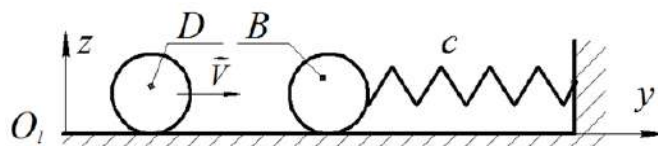
Канчаткова знаходзім $T = 0,236(m_{ct} V_B^2 / 2)$, ці скарачана

$$T = kT_B. \quad (12)$$

У формуле (12) T — кінетычная энергія кансолі з раўнамерна размеркаванай па яе даўжыні масай $m = m_{ct} / l$; kT_B — кінетычная энергія бязважкага стрыжня, маса якога засяроджана на яго канцы B ; $k = 0,236$ — каэфіцыент прывядзення размеркаванай масы m да канца B .

Цяпер у далейшых разліках будзем выкарыстоўваць прыведзеную масу стрыжня $m_B = km_{ct}$ спрошчаную мадэль узаемадзеяння матэрыяльнага пункта D са стрыжнем. У ёй стрыжань заменены матэрыяльным пунктам B масы m_B на спружыне жорсткасці c (рысунак 6). Спружынай мадэліруецца бязважкі стрыжань. Лічым, што матэрыяльны пункт D , рухаючыся з хуткасцю $V = V_B$, дасягае пункта B і далей пачынае рухацца сумесна з ім з новай пачатковай хуткасцю V_0 .

Для вызначэння хуткасці скарыстаемся тэарэмай аб змяненні колькасці руху механічнай сістэмы: $Q_{1y} - Q_{0y} = \sum S_{iy}^e + \sum S_{iy}^i$, дзе $Q_{0y} = m_D V_B$, $Q_{1y} = (m_D + m_B) V_0$ — праекцыі на вось y колькасцей руху сістэмы адпаведна да саўдарэння пунктаў і пасля яго: $\sum S_{iy}^e, \sum S_{iy}^i$ — праекцыі на вось y сум імпульсаў адпаведна знешніх і ўнутраных сіл.



Рысунак 6. — Спрошчаная мадэль узаемадзеяння часціцы D са стрыжнем AB

Паколькі $\sum S_{iy}^e = \sum S_{iy}^i = 0$, то мае месца закон захавання колькасці руху сістэмы: $Q_{1y} = Q_{0y}$, ці $(m_D + m_B)V_0 = m_D V_B$; адсюль

$$V_0 = [m_D / (m_D + m_B)] V_B. \quad (13)$$

Пераходзім да вылічэння сілы ўзаемадзеяння сістэмы целаў D і B са спружынай, г. зн. з кансоллю. Прымяняем тэарэму аб змяненні кінетычнай энергіі:

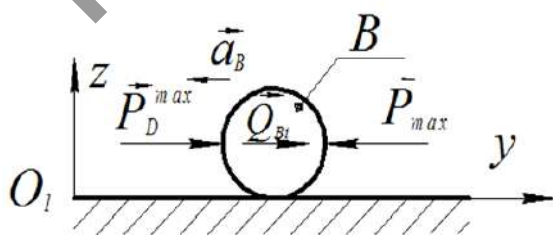
$$T_1 - T_0 = \sum A_i, \quad (14)$$

дзе T_1, T_0 — кінетычная энергія на пачатку і ў канцы сумеснага руху сістэмы (калі яна спынілася); пры гэтым $T_0 = T_D + T_B = (m_D + m_B)V_0^2 / 2$, $T_1 = 0$. Пры вылічэнні сумы работ $\sum A_i$ ігнаруем сілай цяжару; улічваем толькі пераменную сілу пругкасці спружыны, якая ў момант спынення дасягае найбольшага значэння P_{\max} . Яе работа роўна $(-P_{\max}^2 / 2c)$. Тады роўнасць (14) прымае выгляд $(m_D + m_B)V_0^2 / 2 = P_{\max}^2 / 2c$. Адсюль $P_{\max} = V_0 \sqrt{c(m_D + m_B)}$, ці, з улікам (13),

$$P_{\max} = \gamma_m \sqrt{m_D c} V_B, \quad (15)$$

дзе $\gamma_m = \sqrt{m_D / (m_D + m_B)}$. Нагадаем, што ў формуле (15) P_{\max} — сіла ўзаемадзеяння сістэмы целаў B, D са спружынай, а нас цікавіць унутраная сіла P_D^{\max} , што ўзнікае паміж целамаі B, D , дзе здрабняецца цела (часцінка) D . Для вызначэння сілы P_D^{\max} скарыстаемся метадам кінестатыкі, пабудаванай на прынцыпе Д'Аламбера.

Выдзелім з механічнай сістэмы ў момант яе спынення ў крайнім правым становішчы (паводле рысунка 6) цела B (рысунак 7). На яго дзейнічаюць сілы: P_D^{\max}, P_{\max} — ціск цела і рэакцыя спружыны адпаведна; $Q_{Bi} = m_B a_B$ — сіла інерцыі. Сілу цяжару і рэакцыю плоскасці, як ураўнаважання, не ўлічваем. Паскарэнне $a_B = P_{\max} / (m_D + m_B)$. Запісваем умову раўнавагі цела B : $\sum V_i = P_D^{\max} - P_{\max} + Q_{Bi} = 0$; адсюль $P_D^{\max} = P_{\max} - Q_{Bi} = [1 - m_B / (m_D + m_B)] P_{\max}$. Канчаткова з улікам (15) атрымліваем $P_D^{\max} = \gamma_m \gamma'_m \sqrt{m_D c} V_B$, дзе $\gamma'_m = 1 - m_B / (m_D + m_B)$. На рысунку 7 сіла



Рысунак 7. — Раўнавага матэрыяльнага пункта B паводле метаду кінестатыкі

P_D^{\max} прыкладзена да цела B , г. зн. дзейнічае на кансолі. Такая ж сіла з боку кансолі дзейнічае на часцінку D . Сіле P_{\max} адпавядае перамяшчэнне канца B кансолі f_{\max} . Каб яго знайсці, улічым залежнасць $P_{\max} = c f_{\max}$. Тады правая частка роўнасці (14) прымае выгляд $\sum A_i = -c f_{\max}^2 / 2$. Паўтарыўшы тыя ж дзеянні, што і пры вызначэнні P_{\max} , атрымаем $f_{\max} = \gamma_m \sqrt{m_D / c} V_B$.

Заключэнне. У артыкуле выкладзена методыка даследавання напружана-дэфармаванага стану драцянога рабочага элемента здрабняльнай машыны. Паказана, што з улікам сіл цяжару напружанні і дэфармацыі маюць цыклічны характар з асіметрычнымі цыкламі і малымі амплітудамі ваганняў. Пры павелічэнні частаты вярчэння ротара ўплыў сіл цяжару памяншаецца.

Распрацавана методыка вызначэння сілы, што ўзнікае падчас удару прутковага (драцянога) элемента ротара па здрабняемай часцінцы. Інфармацыя аб трываласці здрабняемых часцінак і ўстаноўленыя ў даследаванні фактары, што вызначаюць велічыню сілы ўзаемадзеяння P_D^{\max} , дазваляюць рацыянальна выбіраць геаметрычныя, кінематычныя і інерцыйныя (масавыя) параметры праектуемых ротараў здрабняльных машын.

Спіс цытаваных крыніц

1. Вопросы развития техники и технологии измельчения материалов / Л. А. Сиваченко [и др.] // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2010. — С. 315—321.
2. Севостьянов, В. С. Технологические аппараты с иглофрезерными рабочими органами для комплексной переработки композиционных материалов / В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко, С. А. Михайличенко // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2015. — № 2. — С. 50—56.
3. Наливко, О. И. Разработка конструкции валкового измельчителя / О. И. Наливко, Е. С. Живула // Экономика, технологии и право в современном мире : материалы Междунар. науч.-практ. конф. — Барановичи: БарГУ, 2018. — С. 135.
4. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. — М. : Наука, 1986. — 512 с.
5. Чигарев, А. В. Курс теоретической механики / А. В. Чигарев, Ю. В. Чигарев. — Минск : Новое знание ; М. : ЦУПД, 2010. — 397 с.
6. Хвясько, Г. М. Курс тэарэтычнай механікі / Г. М. Хвясько. — Мінск : БДТУ, 2000. — 354 с.

Паступіў у рэдакцыю 23.04.2020