

УДК 621.926

А. І. Наліўко¹, С. І. Русан¹, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт,
Л. А. Сівачэнка², доктар тэхнічных навук, прафесар, **Т. Л. Сівачэнка³**

¹Установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт», вул. Войкава, 21, 225404 Баранавічы,
Рэспубліка Беларусь, +375 (33) 699 45 01, alehnaliuko@mail.ru

²Міждзяржаўная адукацыйная ўстанова вышэйшай адукацыі «Беларуска-Расійскі ўніверсітэт», пр-т Міру, 43,
212000 Магілёў, Рэспубліка Беларусь, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru

³Унітарнае прыватнае вытворчае прадпрыемства «КБ “Прамысловыя тэхналогіі і комплексы”»,
вул. Грушаўская, 32, 212003 Магілёў, Рэспубліка Беларусь, +375 (44) 453 88 08 tatsianamail.86@gmail.com

МЕТОДЫКА НАБЛІЖАНАГА АНАЛІЗУ СІЛОВОГА ЎЗАЕМАДЗЕЙНЯ Ў ЗДРАБНЯЛЬНЫХ МАШЫНАХ СА ШЧОТКАПАДОБНЫМІ ЗВЁНАМІ

Выкладзена методыка вызначэння сродкамі тэарэтычнай механікі рэактыўных сіл узаемадзеяння рабочых звёнаў машыны з часціцай здрабняльнай фракцыі матэрыялу. Паказана магчымасць выкарыстання атрыманых вынікаў для пераходу да ўдасканаленай (дэфарматыўнай) мадэлі ўзаемадзеяння.

Ключавыя словы: методыка; стрыжань; здрабненне; вугал ахопу; драцяны элемент; здрабняльная машына.
Рыс. 5. Бібліягр.: 4 назваў.

O. I. Naliuko¹, S. I. Rusan¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
L. A. Sivachenko², DSc in Technical Sciences, Professor, **T. L. Sivachenko³**

¹Educational Institution “Baranovich State University”, 21 Voykov Str., 225404 Baranovich,
the Republic of Belarus, +375 (33) 699 45 01, alehnaliuko@mail.ru

²Interstate Educational Institution of Higher Education “Belarusian-Russian University”, 43 Mira Ave.,
212000 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru

³Unitary Private Production Enterprise “DB ‘Industrial technologies and complexes’”, 32 Grushevskaya Str.,
212003 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (44) 453 88 08, tatsianamail.86@gmail.com

METHOD OF APPROXIMATE ANALYSIS OF FORCE INTERACTION IN GRINDING MACHINES WITH BRUSH-LIKE LINKS

The method of determination by means of theoretical mechanics of the reactive forces of the working brush-like links interaction of the machine with a particle of the crushed fraction of the material is described. The possibility of using the obtained results for the transition to an improved (deformative) interaction model is shown.

Key words: technique; rod; grinding; angular velocity; coverage angle; wire element; grinding machine.
Fig. 5. Ref.: 4 titles.

Уводзіны. Устойлівае развіццё прамысловасці не магчыма без інавацыйнага абнаўлення тэхналагічнай сферы і стварэння высокаэфектыўных тэхналогій, машын і абсталявання. У сучасных умовах найбольшае практычнае значэнне маюць тыя механізмы ўздзеяння, якія непасрэдна звязаны з комплекснай перапрацоўкай сыравіны і матэрыялаў, прызначанай для атрымання прадуктаў, неабходных для задавальнення жыццёвых запатрабаванняў чалавека.

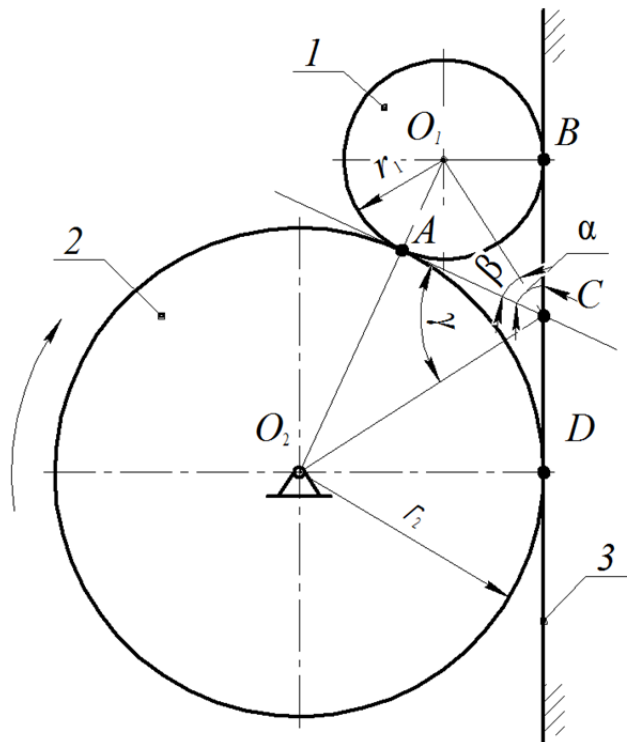
Важнай уласцівасцю для здрабняльнага абсталявання новага пакалення з’яўляецца забеспячэнне яго адаптыўнасці да перапрацоўкі розных па сваіх характарыстыках матэрыялаў.

Вызначальнай умовай пры стварэнні новых канструкцый здрабняльных машын з’яўляецца гатоўнасць навукова-метадычнай базы для іх праектавання і магчымасці камплектацыі базавых вузлоў і рабочых органаў на аснове асвоеных прамысловасцю вырабаў.

Матэрыялы і метады даследавання. Тыпы здрабняльных машын і тэхналогіі перапрацоўкі матэрыялаў апісаны ў манаграфіі [1]. У нашым даследаванні засяродзім увагу на прыватнай канструкцыі машыны з рабочымі звёнамі, паверхні якіх выраблены ў выглядзе драцяных шчотак. Фрагмент прынцыповай схемы такой машыны паказаны на рысунку 1, дзе лічбамі 1, 2, 3 абазначаны, адпаведна, часцінка рэчыва, рухомая шчотка і нерухомае шчака. Як бачым, часцінка мадэлюецца ідэальным шарыкам радыуса r_1 (на рысунку яна для зручнасці даследавання значна павялічана). Такая мадэль найлепш характарызуе грануляваныя фракцыі матэрыялаў. Свабодныя канцы дроцікаў цыліндрычнай шчоткі 2 знаходзяцца на адлегласці r_2 ад восі яе вярчэння. Мяркуем, што геаметрычныя параметры r_1 , r_2 сістэмы на ўваходзе часцінкі ў зону разбурэння застаюцца нязменнымі. Рэчыва, што здрабняецца, знаходзіцца ў абмежаванай прасторы над шчоткай. Пры яе вярчэнні часцінкі рэчыва захопліваюцца дроцікамі шчоткі, уцягваюцца ў зону разбурэння, дзе здрабняюцца (ці сціраюцца ў парашок). Пры магчымасці ўдакладнення разліковая схема будзе напісана напрыканцы даследавання.

Вынікі даследавання і іх абмеркаванне. Устаноўім неабходныя ў далейшым аналігічныя залежнасці паміж лінейнымі і вуглавымі параметрамі механічнай сістэмы 1—2—3 (гл. рысунак 1). Вугал α паміж датычнымі CA і CB да экватэрыяльнай паверхні часцінкі з вяршыняй у пункце іх перасячэння C будзем называць вуглом ахопу часцінкі. Яму адпавядае дуга AB з цэнтральным вуглом $\angle AO_1B$ ($\angle AO_1B \leq \pi$). Паводле рысунка 1 $\angle ABC + \angle ACD = \pi$, пры гэтым $\beta = \angle ABC / 2 = \alpha / 2$, $\gamma = \angle ACD / 2$. Таму $\beta + \alpha = \pi / 2$. У прававугольным трохвугольніку O_1CO_2 адрэзак CA перпендыкулярны да гіпатэнузы O_1O_2 , што дазваляе запісаць суадносіны $r_1 / AC = AC / r_2$. Памножым іх на r_1 / AC , атрымаем $(r_1 / AC)^2 = r_1 / r_2$ ці $\rho = r_1 / r_2$. Адсюль знаходзім

$$\alpha = 2 \arctg(\sqrt{\rho}). \quad (1)$$



Рысунак 1. — Рабочыя звёны здрабняльнай машыны (2, 3)

З формулы (1) відаць, што вугал ахопу α часцінкі залежыць выключна ад суадносін ρ радыусаў r_1, r_2 . А калі ўлічыць, што ў дзеючай машыне $r_2 = \text{const}$, а змяняцца могуць толькі размеры часцінак, то вугал α можна разглядаць як функцыю толькі іх параметра r_1 . Для нагляднасці на рысунку 2 прадстаўлены графік змянення вугла α у межах $r_1 = (0,1 \dots 0,4) r_2$. Як бачым, залежнасць (1) блізкая да лінейнай; $r_1 \rightarrow 0$, вугал $\alpha \rightarrow 0$.

Пераходзім да аналізу сілавога ўзаемадзеяння ў здрабняльнай машыне. Павольны рух часцінкі падчас уваходжання ў кантакт са звёнамі 2, 3 будзем лічыць раўнамерным. Гэта дазваляе ігнараваць сілы інерцыі і вызначаць яе сілы ўзаемадзеяння са звёнамі 2, 3 з умоў раўнавагі. Паводле metodyкі, выкладзенай у курсе тэарэтычнай механікі [2; 3], аб’ектам раўнавагі ў сістэме 1—2—3 з’яўляецца часцінка 1; сувязямі, накладзенымі на яе, служаць паверхні звёнаў 2, 3 у пунктах A, B . Рэакцыі сувязей (сілы ўзаемадзеяння часцінкі са звёнамі 2, 3) на рысунку 3 абазначаны літарамі N_A, S_A, N_B, S_B і прыкладзены да часцінкі 1. Такія ж сілы процілеглага напрамку дзейнічаюць на звёны 2, 3. Да актыўных сіл належаць: сіла цяжару часцінкі і сілы ціску рэчыва, што змешчана ў прасторы над часцінкай. Актыўныя сілы вызначаюцца асобна і ў нашай задачы лічацца зададзенымі. Прыводзім іх да цэнтра O_1 , атрымліваем раўнадейную P і пару сіл з момантам M (гл. рысунак 3). Вугал θ знаходзіцца ў працэсе прывядзення сістэмы актыўных сіл да цэнтра O_1 . Заўважым, што часцінка 1 пры павароце шчоткі 2 можа ўцягвацца ў зону разбурэння, а можа і заставацца нерухомай (ці выслізгваць са звёнаў 2, 3). Гэта залежыць як ад вугла ахопу α , так і ад дзеючых на часцінку сіл. Значэнне α , пры якім часцінка пад дзеяннем прыкладзеных да яе сіл рухаецца ў зону разбурэння (ці застаецца ў раўнавазе), называюць вуглом захопу. Ён таксама вылічваецца па формуле (1) з дадатковымі ўмовамі, накладзенымі на сістэму сіл. Далей будзем лічыць, што гэтыя ўмовы выконваюцца.

Уводзім сістэму восей каардынат O_1x і запісваем умовы раўнавагі:

$$\sum X_i = 0; \sum Y_i = 0; \sum M(O_1) = 0. \tag{2}$$

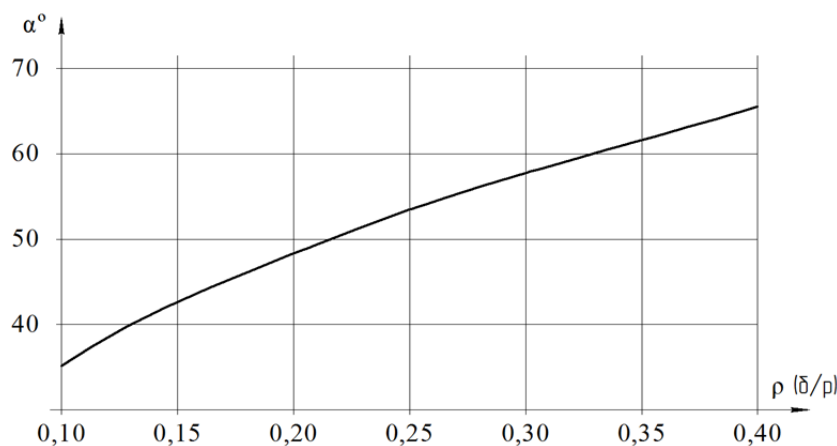
Улічваем, што $S_A = fN_A$. Як бачым, задача статычна вызначальная. Карыстаючыся рысункам 3, запісваем умовы (2) у разгорнутым выглядзе:

$$P_B N_A - N_B + P \sin \theta = 0; \tag{3}$$

$$P_C N_A - S_B + P \cos \theta = 0; \tag{4}$$

$$f r_1 N_A - S_B r_1 - M = 0, \tag{5}$$

дзе f — каэфіцыент трэння ў пункце A .



Рысунак 2. — Ілюстрацыя залежнасці вугла ахопу α ад суадносін радыусаў ρ

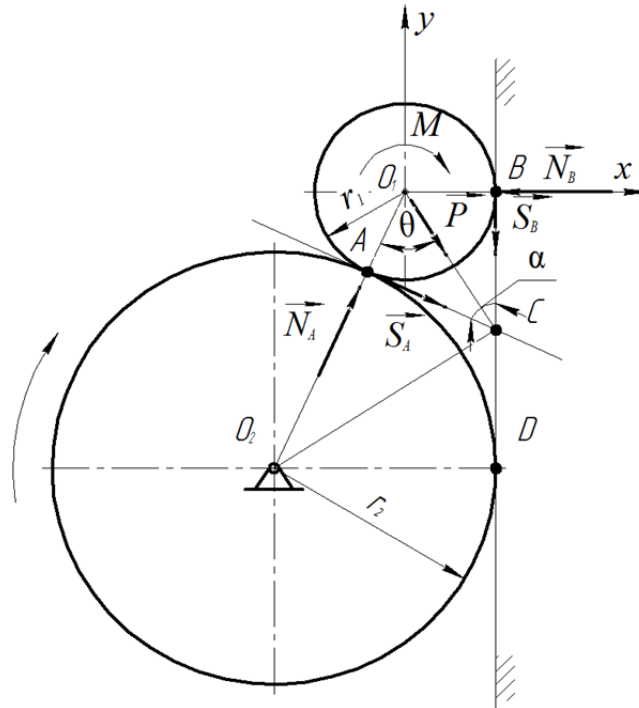


Рисунок 3. — Схема сил взаємодіяння
рабочих зв'язків машини з часцінкою рэчыва

З роўнасці (5) $S_B = fN_A - M / r_1$ падстаўляем S_B у (4):

$$fN_A - P \cos \theta + M / r_1 = 0.$$

Атрымліваем выраз

$$N_A = Q / P_A. \quad (6)$$

Падстаўляем N_A у роўнасць (3). З атрыманага выражэння знаходзім

$$N_B = (P_B / P_A)Q + P \sin \theta. \quad (7)$$

Далей з ураўнення (4) атрымліваем

$$S_B = (P_C / P_A)Q + P \cos \theta. \quad (8)$$

І, як раней адзначалася,

$$S_A = f(Q / P_A). \quad (9)$$

Карыстаючыся ўмовамі раўнавагі і rysункам 3, знаходзім

$$P_A = \sin \alpha - (1 + \cos \alpha)f; P_B = \cos \alpha + f \sin \alpha; P_C = \sin \alpha - f \cos \alpha; Q = P \cos \theta - M / r_1. \quad (10)$$

Для прадстаўлення сил взаємодіяння (6)...(9) у выглядзе функцыі радыуса часцінкі r_1 неабходна ў формулах (10) перайсці ад вугла захопу α да параметра $\rho = r_1 / r_2$ праз $\operatorname{tg}(\alpha / 2)$. У папулярным даведніку па матэматыцы [4] формулы пераходу ад $\sin \alpha$, $\cos \alpha$ да $\operatorname{tg}(\alpha / 2)$ адсутнічаюць. Каб іх знайсці, выкарыстоўваем прыведзеную ў згаданым выданні залежнасць $t = \operatorname{tg}(\alpha / 2) = \sqrt{(1 - \cos \alpha) / (1 + \cos \alpha)} = \sin \alpha / (1 + \cos \alpha)$. Атрымаем $\sin \alpha = 2t / (1 + t^2)$, $\cos \alpha = (1 - t^2) / (1 + t^2)$. Формулы (10) прымуць наступны выгляд:

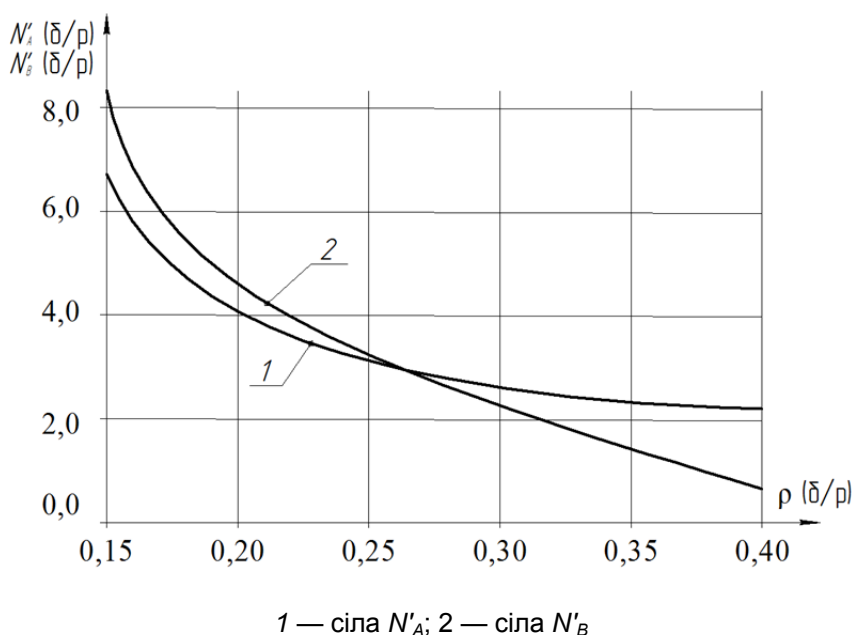
$$P_A = 2(t - f) / (1 + t^2); P_B = (1 + 2ft - t^2) / (1 + t^2); P_C = [2t - f(1 - t^2)] / (1 + t^2).$$

Цяпер велічыні P_A, P_B, P_C , а значыць, і сілы ўзаемадзеяння (6)...(9) можна разглядаць як функцыі суадносін ρ , а пры $r_2 = \text{const}$ — як функцыі радыуса часцінкі r_1 . Заўважым, што кампаненты сіл узаемадзеяння, прыкладзеныя ў пунктах A, B , па-рознаму ўплываюць на разбуэрэнне часцінкі. Датэчныя да яе паверхні сілы S_A, S_B выклікаюць пераважна сціранне, нармальныя N_A, N_B — драбненне. Далей спынімся больш падрабязна на нармальных складальных N_A, N_B . Разгледзім прыватны выпадак, пры якім знешнія сілы, прыкладзеныя да часцінкі, прыводзяцца да раўнадзейнай $Q = P$ ($M = 0$). Прымем $\theta = 0$, тады формулы (6), (7) прымуць наступны выгляд:

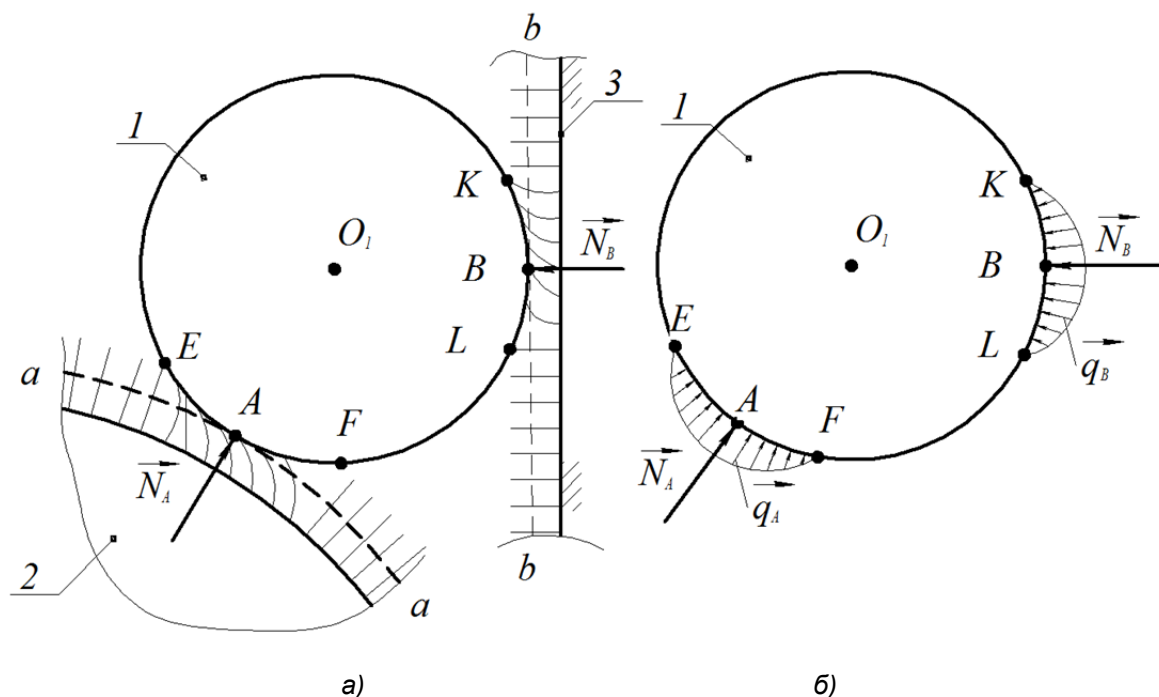
$$N_A = P / P_A; N_B = (P_B / P_A)P. \tag{11}$$

Каб скласці ўяву, як змяняюцца сілы (11) у залежнасці ад радыуса r_1 пры знешнім уздзеянні P , на рысунку 4 пабудаваны іх графікі на інтэрвале $r_1 = (0,1...04)r_2$ (пры $f = 0,3$) у безразмерных каардынатах $N'_A = N_A / P, N'_B = N_B / P$. Паводле іх раўнавага адносна большай часцінкі забяспечваецца меншымі нармальнымі сіламі. Якасна такі вынік можна абгрунтаваць клінавым эфектам: большай часцінцы і, значыць, большаму вуглу α адпавядае болей затуплены клін з меншым сілавым распорам паверхняў 2, 3. Звернем увагу на недахоп графікаў, прадстаўленых на рысунку 4. Яны пабудаваны пры $P = \text{const}$. Мяркуюцца, што велічыня P выбіраецца для некага сярэдняга значэння ρ на выбраным інтэрвале яго змянення. На самой справе раўнадзейная знешніх сіл з'яўляецца бесперапыннай функцыяй размераў часцінкі, г. зн. параметра ρ . Як адзначалася вышэй, яна залежыць ад ціску з боку сумежных часцінак, у меншай ступені — ад сілы цяжару самой часцінкі.

Каб забяспечыць неабходныя для драбнення рэчыва ўласцівасці ігольчастых звёнаў здрабняльных машын (жорсткасць і трываласць іголак), патрэбна больш дасканалая разліковая схема, чым выкарыстаная вышэй (гл. рысункі 1, 3). Яна павінна ўлічваць, найперш, дэфарматыўнасць ігольчастых паверхняў рабочых звёнаў. Сапраўды, кантакт часцінкі 1 са звёнамі 2, 3 мае месца не ў пунктах A, B , а па сферычных паверхнях (лунках). На плоскім рысунку 5, a , гэтыя паверхні ў павялічаным выглядзе прадстаўлены дугамі EAF, KBL . Пры вылічэнні сіл узаемадзеяння габарыты рабочых звёнаў абмяжоўваюцца зрушанымі паверхнямі. На плоскім рысунку 5, a , яны паказаны пункцірнымі лініямі $a—a, b—b$.



Рысунк 4. — Адносныя нармальныя сілы ўзаемадзеяння



Рысунак 5. — Дэфармацыя ігольчастых паверхняў шчоткі 2 і шчакі 3 (а), адпаведныя ёй сілавыя ўздзеянні q_A , q_B на часцінку 1 (б)

Аднак неістотнае змяненне радыуса r_2 (гл. рысункі 1, 3) на практыцы можна ігнараваць. Знойдзеныя раней сілы N_A , N_B ва ўдакладненай разліковай схеме не з'яўляюцца засяроджанымі, а ўяўляюць раўнадзейныя размеркаваных нагрузак q_A , q_B (гл. рысунок 5, б). Прыведзеная канкрэтызацыя сіл узаемадзеяння дазваляе больш дакладна даследаваць напружана-дэфармаваны стан часцінкі. А паколькі такія ж нагрузкі q_A , q_B , але процілеглага напрамку, прыкладзены і да звёнаў 2, 3, то адкрываецца магчымасць вызначыць дэфармацыі і даследаваць трываласць іх ігольчастых паверхняў.

Заклучэнне. У выкананым даследаванні выкладзена методика набліжанага вызначэння сіл узаемадзеяння ігольчастых рабочых звёнаў машыны з элементарнай часцінкай здрабняльнай фракцыі. Атрыманыя рэзультаты дазваляюць перайсці да паглыбленага вывучэння як тэхналагічнага працэсу драблення, так і да ўдасканалення структуры ігольчастых пакрыццяў рабочых органаў машыны.

Спіс цытаваных крыніц

1. Інтенсіфікацыя тэхналагічных працэсаў у апаратах адаптыўнага дзеяння : каллектыў. моногр. / Л. А. Сиваченко [и др.] ; под науч. ред. Л. А. Сиваченко ; М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т. — Барановичи : БарГУ, 2020. — 359 с
2. Чигарев, А. В. Курс теоретической механики / А. В. Чигарев, Ю. В. Чигарев. — Минск : Новое знание ; М. : ЦУПЛ, 2010. — 397 с.
3. Хвясько, Г. М. Курс тэарэтычнай механікі / Г. М. Хвясько. — Мінск : БДТУ, 2000. — 354 с.
4. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. — М. : Гос. изд. техн.-теор. лит., 1957. — 608 с.

Паступіў у рэдакцыю 01.04.2022.