

# Вестник БарГУ

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года  
Выходит 2 раза в год

№ 1 (9), июнь, 2021

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования  
«Барановичский государственный университет».

Адрес редакции:  
ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.  
Телефон: +375 (163) 64 34 77.  
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 опублико-  
вания результатов диссертационных исследований  
по техническим наукам.

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ»  
включен в РИНЦ (Российский индекс научного  
цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.

Выходит на русском и английском языках.  
Распространяется на территории  
Республики Беларусь.

Исполняющий обязанности заведующего  
редакционно-издательской группой Н. Н. Колодко  
Технический редактор Л. Н. Щербук  
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак  
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 31.05.2021. Формат 60 × 84 1/8.  
Бумага ксероксная. Печать цифровая.  
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 10,75. Уч.-изд. л. 6,60.  
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 г. Слоним,  
Гродненская обл.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кочурко В. И. (*гл. ред. журн.*), доктор сельскохозяйственных наук, профессор,  
академик Белорусской инженерной академии, академик Международной  
академии технического образования, академик Международной академии наук  
педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины,  
ректор учреждения образования «Барановичский государственный университет»  
(Барановичи, Республика Беларусь).

Климук В. В. (*зам. гл. ред. журн.*), кандидат экономических наук, доцент,  
проректор по научной работе учреждения образования «Барановичский  
государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Алифанов А. В. (*гл. ред. сер.*), лауреат Государственной премии Республики  
Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор  
(Барановичи, Республика Беларусь); Горбач Ю. Е. (*отв. секретарь сер.*)  
(Барановичи, Республика Беларусь).

Леон О. В. (*ред. текстов на англ. яз.*), кандидат филологических наук  
(Барановичи, Республика Беларусь).

Богданович И. А. (*отв. за направление «Машиностроение и машиноведение»*),  
кандидат технических наук, доцент (Барановичи, Республика Беларусь);  
Дубень И. В. (*отв. за направление «Процессы и машины агроинженерных  
систем»*), кандидат технических наук (Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Г. И., кандидат технических наук, доцент (Минск, Республика  
Беларусь); Белый А. В., член-корреспондент Национальной академии наук  
Беларуси, доктор технических наук, профессор (Минск, Республика Бела-  
русь); Гавриленя А. К., кандидат технических наук, доцент (Барановичи,  
Республика Беларусь); Девойно О. Г., доктор технических наук, профессор  
(Минск, Республика Беларусь); Дремук В. А., кандидат технических наук  
(Барановичи, Республика Беларусь); Ивашко В. С., доктор технических наук,  
профессор (Минск, Республика Беларусь); Калугин Ю. К., кандидат  
технических наук, доцент (Гродно, Республика Беларусь); Карташевич А. Н.,  
доктор технических наук, профессор (Горки, Республика Беларусь);  
Клочков А. В., доктор технических наук, профессор (Горки, Республика  
Беларусь); Клубович В. В., доктор технических наук, академик  
Национальной академии наук Беларуси, профессор (Минск, Республика  
Беларусь); Сиваченко Л. А., доктор технических наук, профессор (Могилев,  
Республика Беларусь); Томило В. А., доктор технических наук, профессор  
(Минск, Республика Беларусь); Шелег В. К., член-корреспондент  
Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук,  
профессор (Минск, Республика Беларусь).

# BarSU Herald

A quarterly scientific and practical journal

Published since March 2013  
It is published 2 times a year

1 (9), March, 2021

Engineering Series

Promoter: educational institution "Baranovichy State University".

Editorial address:  
21 Voykova Str., 225404 Baranovichy.  
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.

Issued in Russian and English. The journal is distributed  
on the territory of the Republic of Belarus.

Interim managing editor N. N. Kolodko  
Technical editor L. N. Scherbuk  
Desktop Publishing S. M. Glushak  
Proofreader N. N. Kolodko

Signed print 31.05.2021. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.  
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 10,75.  
Acc.-pub. s. l. 6,60. Circulation of 100 copies.  
Order Free price.

Printing performance: Grodno Regional Printing Unitary  
Enterprise "Slonim printing establishment". The state  
registration certificate of the publisher, manufacturer and  
publications distributor № 1/203 of 07.03.2014, № 2  
of 25.02.2014. Address: 16 Hlyupin St., 231800 Slonim,  
Grodno region.

## EDITORIAL BOARD

Kochurko V. I. (*Editor-in-Chief*), 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 (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Klimuk V. V. (*Deputy Editor-in-Chief*), Ph. D. in Economic Sciences, Associate Professor, (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Alifanov A. V. (*Executive Editor of the Issue*), State-Prize Winner of the Republic of Belarus in Science and Technology, Doctor of Technical Sciences, Professor (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Leon O. V., Ph. D in Philological Science (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Bogdanovich I. A. (*in charge of the heading "Machine Building and Engineering Science"*), Ph. D of Technical Science, Associate Professor (Baranovichy, the Republic of Belarus); Duben I. V. (*in charge of the heading "Processes and Machines of Agro-engineering Systems"*), Ph. D. in Technical Sciences (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Aniskovich G. I., Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, the Republic of Belarus); Bely A. V., A. M. of the National Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Gavrilena A. K., Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichy, the Republic of Belarus); Devoino O. G., Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Dremuk V. A., Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichy, the Republic of Belarus); Ivashko V. S., Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Kalugin Y. K., Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Grodno, the Republic of Belarus); Kartashevich A. N., Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus); Klochkov A. V., Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus); Klubovich V. V., Doctor of Technical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Sivachenko L. A., Doctor of Technical Sciences, Professor (Mogilev, the Republic of Belarus); Tomilo V. A., Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Sheleh V. K., A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Дударев В. А., Михальков А. Д., Михальков В. С., Сиваченко Л. А.** Исследование работы вертикальной вибрационной мельницы для измельчения строительных материалов
- Клочков А. В., Емельяненко А. А., Федосов К. С.** Параметры индукции при объемном расположении магнитов
- Милукова А. М., Матяс А. Н., Лях А. А., Горчанин А. И., Толкачева О. А., Хан Цзинь.** Исследование физико-механических свойств титанового сплава после магнитно-импульсной обработки
- Попок Н. Н., Портянко С. А., Тихон Е. М., Анисимов В. С.** Моделирование и регулирование стружкообразования и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды при фрезеровании
- Потапов В. А., Сиваченко Л. А., Дремук В. А.** Исследование влияния режимов работы цепного агрегата на показатели процесса измельчения мела в технологии производства извести
- Романчук И. А., Голубев В. С., Веера И. И.** Особенности формирования упрочняющих покрытий при комплексной лазерной и плазменно-порошковой наплавке

## ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

- Бурдейко В. А., Ловкис В. Б.** Расчет щеток машины для сбора колорадского жука
- Зяц П. В., Казакевич П. П.** Результаты экспериментальных исследований машины для сбора колорадского жука
- Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Заболотный О. Д.** Исследование вязкостно-температурных показателей полусинтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях механических транспортных средств
- Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Заболотный О. Д.** Исследование эксплуатационных показателей полусинтетических моторных масел марки SAE 10W40, используемых в бензиновых двигателях

## MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

- 4 Dudarev V. A., Mikhalkov A. D., Mikhalkov V. S., Sivachenko L. A.** Investigation of the operation of a vertical vibration mill for grinding building materials
- 10 Klochkov A. V., Emelianenko A. A., Fedosov K. S.** Induction parameters by the three-dimensional arrangement of magnets
- 18 Milyukova A. M., Matyas A. N., Liakh A. A., Gorchanin A. I., Tolkacheva O. A., Han Jin.** Improvement of physical and mechanical properties of titanium alloy by magnetic-pulse treatment
- 27 Popok N. N., Partsianka S. A., Tikhon E. M., Anisimov V. S.** Modeling and regulation of chip formation and flows of the lubricating and cooling process medium during milling
- 37 Potapov V. A., Sivachenko L. A., Dremuk V. A.** Research of the influence of the operating modes of the chain unit on the indicators of the process of grinding chalk in the technology of lime production
- 44 Romanchuk I. A., Golubev V. S., Vegera I. I.** Features of forming of consolidating coverages at complex laser and plasma-powder surfacing

## PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

- 53 Burdejko V. A., Lovkis V. B.** Calculation of the brushes of the colorado beetle harvesting machine
- 59 Zayats P. V., Kazakevich P. P.** Results of experimental studies colorado beetle harvesting machines
- 70 Pivovarchik A. A., Gavrilenia A. K., Zabolotny O. D.** Study of viscosity-temperature indices of semi-synthetic engine oils used in gasoline engines of power-driven vehicles
- 77 Pivovarchik A. A., Gavrilenia A. K., Zabolotny O. D.** Performance study of semi-synthetic SAE 10W40 engine oils used in gasoline engines

УДК 621.914.02/532.5.013

**Н. Н. Попок, С. А. Портянко, Е. М. Тихон, В. С. Анисимов**

Учреждение образования «Полоцкий государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Блохина, 29, 211440 Новополоцк, Республика Беларусь, +375 (25) 999 19 61, s.portyanko@psu.by

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ И ПОТОКОВ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Рассмотрены математические модели, описывающие отвод стружки и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды при высокоскоростном фрезеровании, получены зависимости и приведены результаты анализа влияния физических и технологических характеристик обработки на геометрические параметры фрез, даны рекомендации по регулированию стружкопотокоотвода при фрезеровании.

**Ключевые слова:** моделирование; регулирование; фрезерование; фреза; стружкообразование; смазочно-охлаждающая технологическая среда; поток; угол наклона режущей кромки; угол схода стружки.

Рис. 5. Табл. 3. Библиогр.: 9 назв.

**N. N. Popok, S. A. Partsianka, E. M. Tikhon, V. S. Anisimov**

Polotsk State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 29 Blokhina Str., 211440 Novopolotsk, the Republic of Belarus, +375 (25) 999 19 61, s.portyanko@psu.by

## MODELING AND REGULATION OF CHIP FORMATION AND FLOWS OF THE LUBRICATING AND COOLING PROCESS MEDIUM DURING MILLING

The mathematical models describing the chip and flows of cooling and lubricating fluid during high-speed milling, the obtained results of the analysis of the influence of physical and technological parameters of processing on the geometric parameters of the cutter, recommendations for regulation chip of potokovogo when milling.

**Key words:** modeling; regulation; milling; milling cutter; chip formation; lubricating and cooling process medium; flow; angle of inclination of the cutting edge; chip exit angle.

Fig. 5. Table 3. Ref.: 9 titles.

**Введение.** Высокоскоростное резание материалов характеризуется выделением большого количества теплоты, 90...95 % которого удаляется из зоны резания вместе со стружкой и смазочно-охлаждающей технологической средой (далее — СОТС) [1]. При этом используются различные способы и устройства удаления стружки и подвода СОТС. Для многолезвийных режущих инструментов, таких как фрезерные, осевые (сверла, зенкеры развертки), резьбо- и зуборезные и другие, работающих при частоте вращения порядка 10...40 тыс. мин<sup>-1</sup>, наиболее технологичным является выполнение в режущем инструменте стружкоотводящих канавок и подача СОТС в распыленном состоянии.

Повышению эффективности теплоотвода и охлаждения режущего инструмента и детали способствует обеспечение схода стружки и воздействия СОТС в одном направлении. Технически это возможно осуществить путем выбора рациональной геометрической формы и расположения стружкоотводящих канавок в режущем инструменте, учитывающих не только рекомендации по резанию материалов, но и аэрогидродинамические условия работы режущего инструмента.



Во-вторых, глубина резания  $t$  при фрезеровании торцевой фрезой не превышает ширины режущей пластины, а при фрезеровании концевой фрезой определяется высотой (шириной) уступа детали. В-третьих, угловые параметры лезвия — угол  $\beta$  заострения лезвия, передний  $\gamma$  и задний  $\alpha$  углы, главный  $\phi$  и вспомогательный  $\phi_1$  углы в плане лезвия, угол при вершине  $\varepsilon$  — рассматриваются как для главной, так и для вспомогательной (с индексом 1) режущих кромок. В четвертых, режущие кромки имеют соответствующие углы наклона  $\lambda$  и  $\lambda_1$ , определяемые в плоскости резания  $P_n-P_n$  между режущей кромкой и основной плоскостью  $P_v = P_v$ ; угол  $\lambda$  для концевых фрез часто обозначается как угол  $\omega$ , значения  $\lambda$  могут иметь как положительные, так и отрицательные знаки: если главная режущая кромка расположена выше основной плоскости, то значения угла  $\lambda$  положительные, для вспомогательной режущей кромки знаки значений угла  $\lambda_1$  обратные по отношению к  $\lambda$ .

Угол схода стружки  $\eta_c$  зависит от угла наклона режущей кромки  $\lambda$  или  $\lambda_1$  и переднего угла  $\gamma$  или  $\gamma_i$  лезвия режущего инструмента и определяется следующим соотношением [2]:

$$\operatorname{tg} \eta_c = \operatorname{tg} \lambda_i \cos \gamma_i, \quad (1)$$

где  $\lambda_i$  и  $\gamma_i$  — углы наклона режущей кромки и передние углы для главной и вспомогательной режущих кромок лезвия режущего инструмента соответственно.

В зависимости от знака и значений углов  $\lambda_i$  и  $\gamma_i$  изменяется направление угла схода стружки  $\eta_c$ . Возможны три варианта расположения режущей кромки: с нулевым, отрицательным и положительным значениями угла  $\lambda_i$ . При нулевом и отрицательном значениях угла  $\lambda_i$  стружка будет сходиться в сторону обрабатываемой поверхности или периферии фрезы вдоль оси ее вращения, при положительных значениях  $\lambda_i$  — в сторону обработанной поверхности, что нежелательно (см. главный вид на рисунке 1, а, б). Для вспомогательной режущей кромки при отрицательных значениях  $\lambda_i$  (см. условный вид А на рисунке 1, а) стружка будет сходиться в сторону оси фрезы, при нулевых и положительных значениях  $+\lambda_i$  (см. условный вид А на рисунке 1, б) — в сторону периферии фрезы, что является более предпочтительным.

Угол наклона режущей кромки  $\lambda_i$  влияет не только на угол схода стружки, но и на механико-физические характеристики процесса резания. Установлено [2; 3], что увеличение значений угла наклона режущей кромки  $\lambda_i$  до  $45...60^\circ$  способствует снижению сил трения, однако при этом возрастает осевая составляющая силы резания. Поэтому отечественные [4] и зарубежные стандарты [5] рекомендуют принимать значения угла наклона режущих кромок у концевых и торцевых фрез в пределах  $20...45^\circ$  в зависимости от свойств обрабатываемого и инструментального материалов, размеров фрез, геометрических параметров зубьев и т. п.

Для учета влияния механико-физических характеристик фрезерования на выбор угла схода стружки воспользуемся ранее полученными зависимостями [6] для силы резания  $N$ , действующей по нормали к режущей кромке:

$$N = \frac{N_{yz}}{\cos \theta} \cos(\theta + \gamma_i),$$

где  $N_{yz} = P'_z \frac{\cos(\lambda_i - \nu)}{\cos \nu}$  — нормальная сила, действующая вдоль поверхности резания, где  $\lambda_i$  — угол наклона режущей кромки,  $P'_z = P_z - F_{1z}$  — часть главной составляющей силы резания, где  $F_{1z}$  — сила трения, действующая на поверхности резания вдоль оси  $z$  в сторону, обратную рабочему движению инструмента;

$\gamma_i$  — передний угол лезвия.

Примем согласно рекомендациям [2] силу трения  $F_{1z}$  и нормальную силу  $N_1$  со стороны задней поверхности лезвия равными нулю, тогда  $P'_z = P_z$ ,  $P'_x = P_x$ , получим

$$N = P_z \frac{\cos(\lambda_i - \nu)}{\cos \nu \cos \theta} \cos(\theta + \gamma_i). \quad (2)$$

Выведем из выражения (2) угол наклона режущей кромки  $\lambda_i$ :

$$\lambda_i = \nu \pm \arccos \left[ \frac{N \cos \nu \cos \theta}{P_z \cos(\theta + \gamma_i)} \right]. \quad (3)$$

Подставим выражение (3) в формулу (1) для угла схода стружки и получим

$$\eta_{ci} = \arctg \left[ \cos \gamma_i \operatorname{tg} \left( \nu \pm \arccos \left[ \frac{N \cos \nu \cos \theta}{P_z \cos(\theta + \gamma_i)} \right] \right) \right],$$

где  $\operatorname{tg} \nu = \frac{P_y}{P_z}$ .

**Результаты исследования и их обсуждение.** Для заданных значений  $P_z = 300 \dots 10\,000$  Н, соотношений  $P_x = (0,2 - 0,5)P_z$ ,  $P_y = (0,3 - 0,6)P_z$  и угла  $\gamma_i = 5 \dots 15^\circ$  и  $15 \dots 30^\circ$  был произведен расчет значений углов наклона режущей кромки и схода стружки, фрагменты которого представлены ниже (таблица 1, рисунок 2; таблица 2, рисунок 3).

Т а б л и ц а 1. — Данные значений  $\lambda_i$  и  $\eta_{ci}$  при  $\gamma_i = 5 \dots 15^\circ$  и  $N = 300 \dots 900$  Н

N, Н	$\gamma_i = 5^\circ$		$\gamma_i = 10^\circ$		$\gamma_i = 15^\circ$	
	$\lambda_i$	$\eta_{ci}$	$\lambda_i$	$\eta_{ci}$	$\lambda_i$	$\eta_{ci}$
300	88,98	88,97	87,75	87,74	86,33	86,20
400	83,08	83,05	1,73	81,70	80,13	79,79
500	76,90	76,86	75,40	75,35	73,57	73,02
600	70,31	70,25	68,61	68,54	66,48	65,71
700	63,12	63,03	61,12	61,03	58,54	57,65
800	54,92	54,82	52,45	52,35	49,10	48,12
900	44,83	44,72	41,34	41,23	36,04	35,09
N, Н	$\gamma_i = 0,0872$ рад		$\gamma_i = 0,1744$ рад		$\gamma_i = 0,2616$ рад	
	$\lambda_i$	$\eta_{ci}$	$\lambda_i$	$\eta_{ci}$	$\lambda_i$	$\eta_{ci}$
300	1,5521	1,5520	1,5307	1,5305	1,506	1,5037
400	1,4493	1,4488	1,4257	1,4252	1,3978	1,3919
500	1,3416	1,3407	1,3154	1,3144	1,2834	1,2739
600	1,2267	1,2255	1,1969	1,1967	1,1596	1,1468
700	1,1011	1,0995	1,0663	1,0647	1,0212	1,0056
800	0,9581	0,9563	0,9149	0,9132	0,8566	0,8394
900	0,7820	0,7800	0,7212	0,7293	0,6286	0,6123

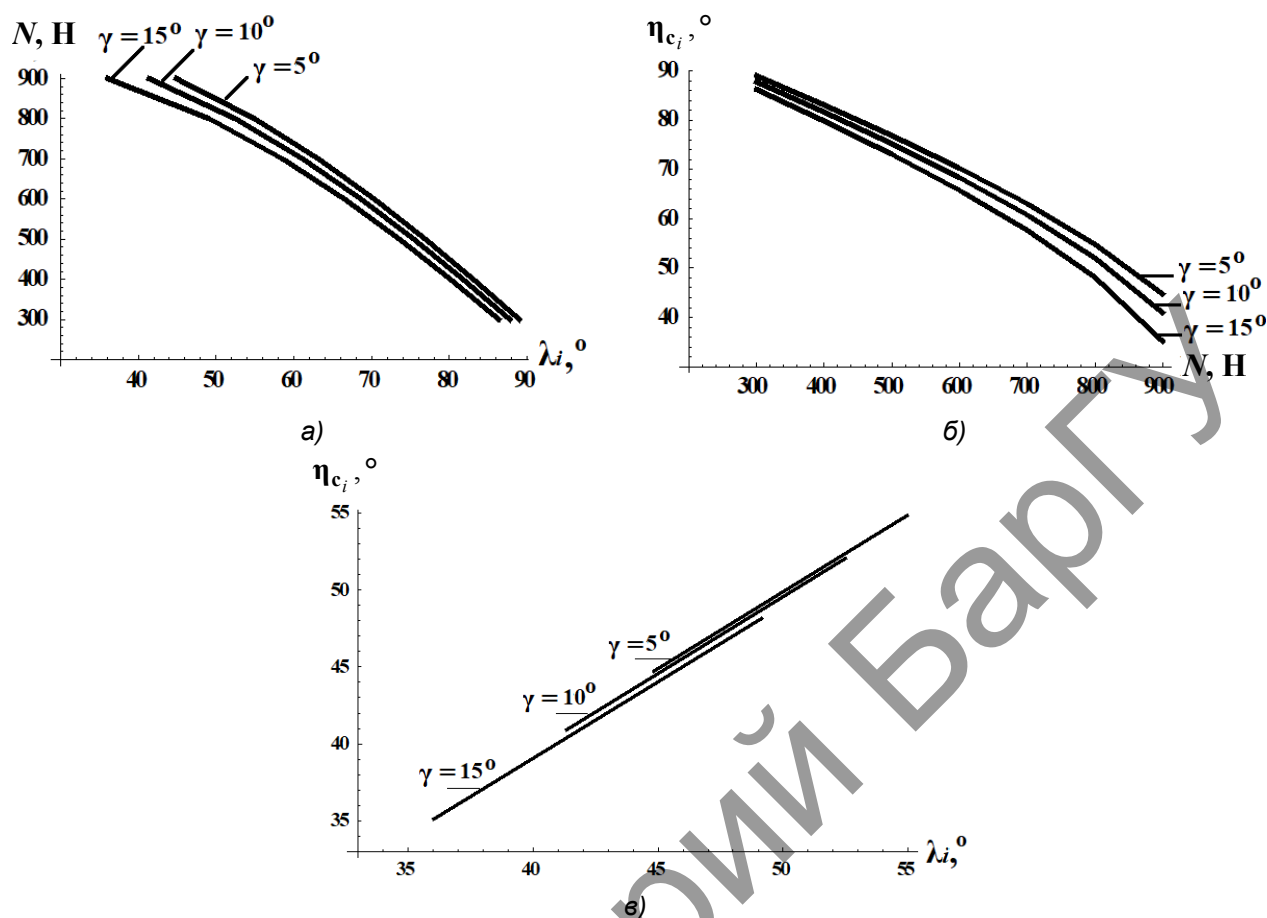


Рисунок 2. — Зависимости нормальной силы  $N$  от угла наклона режущей кромки  $\lambda_i$  (а), угла схода стружки  $\eta_{c_i}$  от нормальной силы  $N$  (б) и угла наклона режущей кромки  $\lambda_i$  (в) при различных значениях переднего угла  $\gamma_i$

Т а б л и ц а 2. — Данные значений  $\lambda_i$  и  $\eta_{c_i}$  при  $\gamma_i = 15...30^\circ$  и  $N = 3\,000...8\,000$  Н

N, Н	$\gamma_i = 15^\circ$		$\gamma_i = 20^\circ$		$\gamma_i = 25^\circ$		$\gamma_i = 30^\circ$	
	$\lambda_i$	$\eta_{c_i}$	$\lambda_i$	$\eta_{c_i}$	$\lambda_i$	$\eta_{c_i}$	$\lambda_i$	$\eta_{c_i}$
2 000	92,32	87,75	90,90	89,20	89,28	89,20	87,40	87,00
3 000	86,35	86,23	84,72	84,38	82,80	82,06	80,53	79,09
4 000	80,16	79,81	78,25	77,52	75,97	74,58	73,21	70,78
5 000	73,59	73,05	71,36	70,25	68,62	66,63	65,20	61,92
6 000	66,50	65,76	63,82	62,38	60,42	57,95	56,05	52,14
7 000	58,56	57,66	55,20	53,51	50,75	47,97	44,56	40,47
8 000	49,12	48,13	44,48	42,70	37,57	34,88	22,48	19,72
N, Н	$\gamma_i = 0,2616$ рад		$\gamma_i = 0,3488$ рад		$\gamma_i = 0,436$		$\gamma_i = 0,5232$ рад	
	$\lambda_i$	$\eta_{c_i}$	$\lambda_i$	$\eta_{c_i}$	$\lambda_i$	$\eta_{c_i}$	$\lambda_i$	$\eta_{c_i}$
2 000	1,6099	1,5305	1,5852	1,5550	1,5570	1,5550	1,5243	1,5171
3 000	1,5060	1,5037	1,4774	1,4715	1,4439	1,4309	1,4043	1,3792
4 000	1,3978	1,3919	1,3646	1,3518	1,3248	1,3006	1,2767	1,2344
5 000	1,2834	1,2739	1,244	1,2251	1,1966	1,1619	1,1371	1,0799
6 000	1,1596	1,1468	1,1129	1,0878	1,0537	1,0105	0,9774	0,9093
7 000	1,0211	1,0056	0,9626	0,9332	0,8851	0,8365	0,7770	0,7057
8 000	0,8566	0,8394	0,7757	0,7447	0,6551	0,6083	0,3921	0,3440

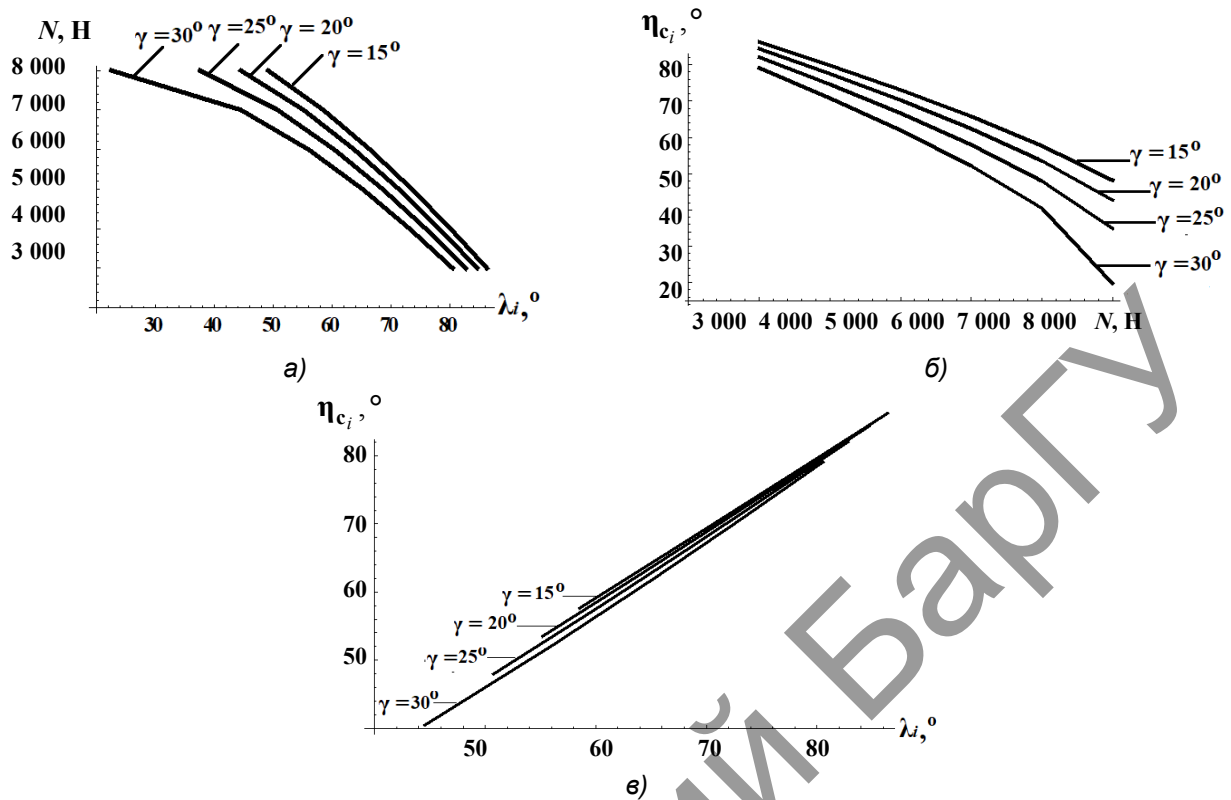


Рисунок 3. — Зависимости нормальной силы  $N$  от угла наклона режущей кромки  $\lambda_i$  (а), угла схода стружки  $\eta_{сi}$  от нормальной силы  $N$  (б) и угла наклона режущей кромки  $\lambda_i$  (в) при различных значениях переднего угла  $\gamma_i$

Как видно из графиков, с увеличением угла  $\lambda_i$  нормальная сила  $N$  уменьшается, причем ее значения тем меньше, чем больше значения переднего угла  $\gamma_i$ . Уменьшение  $N$  способствует увеличению  $\eta_{сi}$ , угол  $\eta_{сi}$  также возрастает при увеличении  $\lambda_i$ . При увеличении соотношений  $P_x / P_z$  и  $P_y / P_z$  нормальная сила несколько возрастает, что необходимо учитывать при выборе значений  $\lambda_i$  и  $v$ .

Характерные изменения кривых на графиках (резкие переходы и сдвиги значений) обусловлены влиянием тригонометрических функций.

Рассмотрим аэрогидродинамические условия работы вращающейся фрезы в смазочно-охлаждающей технологической среде (см. условный вид А на рисунке 1). При высокоскоростной обработке СОТС подается в зону резания в распыленном состоянии в виде жидкогазового конденсата. Поверхности и режущие кромки вращающейся фрезы захватывают и перераспределяют потоки СОТС согласно описываемым математическим и физическим моделям [7; 8]. В частности, изменение координаты препятствия (в нашем случае это высота режущей пластины и глубина (ширина) стружкоотводящей канавки) предлагается определять по формуле И. Ньютона:

$$\partial y = \frac{\mu \partial W S}{F}, \quad (4)$$

где  $\partial y$  — изменение координаты препятствия по нормали к линейной скорости потока СОТС, м;

$\mu$  — коэффициент динамической вязкости среды, Па · с;

$\partial W$  — изменение скорости потока СОТС, м / с;

$S$  — площадь препятствия, м<sup>2</sup>;

$F$  — сила взаимодействия СОТС и препятствия, Н.

Процесс схода стружки при высокой температуре резания может быть представлен как процесс, протекающий в вязкотекучей среде, образованной СОТС и приконтактными слоями обрабатываемого материала и инструмента [9]. В этих условиях явление сдвига в твердых телах и распределении напряжений в потоке жидкости аналогичны.

Тогда допустимо выражение (2) подставить в формулу (4). В результате получим

$$\partial y = \frac{\mu \partial v_c S \cos \nu \cos \theta}{P_z \cos(\lambda_i - \nu) \cos(\theta + \gamma_i)}. \quad (5)$$

Для расчетов принимается  $\mu = 1,787 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $S = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ , скорость потока среды  $W$  приравнивается к скорости схода стружки  $v_c$ , которая, в свою очередь, определяется как отношение линейной скорости вращения фрезы к коэффициенту усадки стружки  $k$ , т. е.  $W = v_c = v / k$ , тем самым учитывается деформация срезаемого слоя. Для углеродистых конструкционных сталей принимается  $k = 3 \dots 5$ . Если принять  $v = 0,5 \dots 3,5 \text{ м / с}$ , то  $v_c = 0,15 \dots 1,2 \text{ м / с}$ . Сила  $F$  принимается равной нормальной силе  $N$ .

Результаты расчетов по формуле (5), имеющие действительные и мнимые части, представлены в таблице 3 и на рисунке 4.

Т а б л и ц а 3. — Данные значений  $y$  при  $\lambda_i = 30 \dots 90^\circ$  и  $v_c = 0,1 \dots 1,1 \text{ м / с}$

$v_c, \text{ м / с}$	$y, \text{ мм}$						
	$\lambda_i = 30^\circ$	$\lambda_i = 40^\circ$	$\lambda_i = 50^\circ$	$\lambda_i = 60^\circ$	$\lambda_i = 70^\circ$	$\lambda_i = 80^\circ$	$\lambda_i = 90^\circ$
0,10	2,96	2,53	2,28	2,14	2,08	2,09	2,17
0,35	10,35	8,85	7,97	7,48	7,27	7,31	7,61
0,60	17,74	15,17	13,66	12,82	12,46	12,53	13,04
0,85	25,13	21,49	19,36	18,16	17,66	17,76	18,48
1,10	32,52	27,82	25,05	23,5	22,85	22,98	23,91

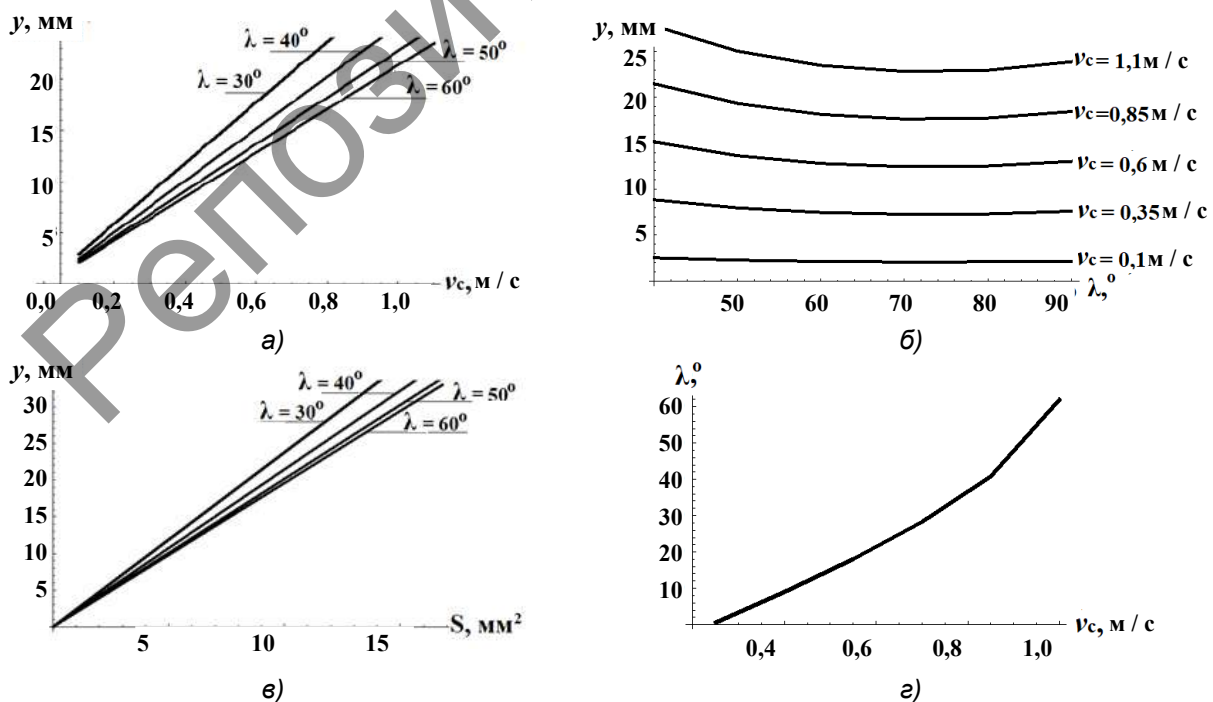


Рисунок 4. — Зависимости изменения координаты  $y$  от скорости стружки  $v_c$ , (а), площади  $S$  (б), угла  $\lambda_i$  (в) и угла  $\lambda_i$  от скорости стружки  $v_c$ , (г)

Как следует из графиков, увеличение скорости схода стружки  $v_c$  (потока  $W$ ) и площади поверхности режущей пластины (препятствия)  $S$ , а также уменьшение силы сопротивления  $F$  и увеличение угла  $\lambda_i$  приводят к снижению координаты  $y$ , его влияние тем больше, чем больше скорость потока  $W$ . При этом установлен диапазон изменений значений  $\lambda_i$   $50...80^\circ$ , при котором координата  $y$  принимает минимальные значения. Угол  $\lambda_i$  возрастает при увеличении скорости потока  $W$ . Характер данных зависимостей сопоставим с полученными для угла схода стружки  $\eta_c$  (см. рисунки 2, 3) и тем самым подтверждает однонаправленность потоков СОТС и стружки.

Зависимости на рисунках 2 и 3 построены при отрицательных значениях  $\lambda_i$  и  $\gamma_i$ , для положительных значений  $\lambda_i$  и  $\gamma_i$  эти зависимости имеют аналогичный зеркально отраженный вид. Изменение координаты  $y$  зависит от заданных значений скорости  $W$  и силы  $F$ : увеличение линейной скорости  $W$  более 10 м / с и уменьшение силы до значения менее 300 Н приводит к росту координаты  $y$  до величины, несоизмеримой с высотой режущей пластины (порядка 10...30 мм) и размерами зоны резания (0,1...5,0 мм). Из этого следует подтверждение установленного факта, что при высокоскоростном резании имеется возможность увеличения толщины  $a$  (подачи  $S_0$ ):  $a = S_0 \sin \varphi$ ; ширины  $b$  (глубины  $t$ ) резания:  $b = t / \sin \varphi$  срезаемого слоя, что приведет к увеличению силы сопротивления и более эффективному использованию мощности привода станка, а также повышению производительности обработки.

С учетом результатов расчетов угла схода стружки и расположения режущей кромки в инструменте для проведения дальнейших лабораторных испытаний и выработки окончательных рекомендаций по рациональным геометрическим параметрам были спроектированы экспериментальные образцы торцовых фрез, представленные на рисунке 5.

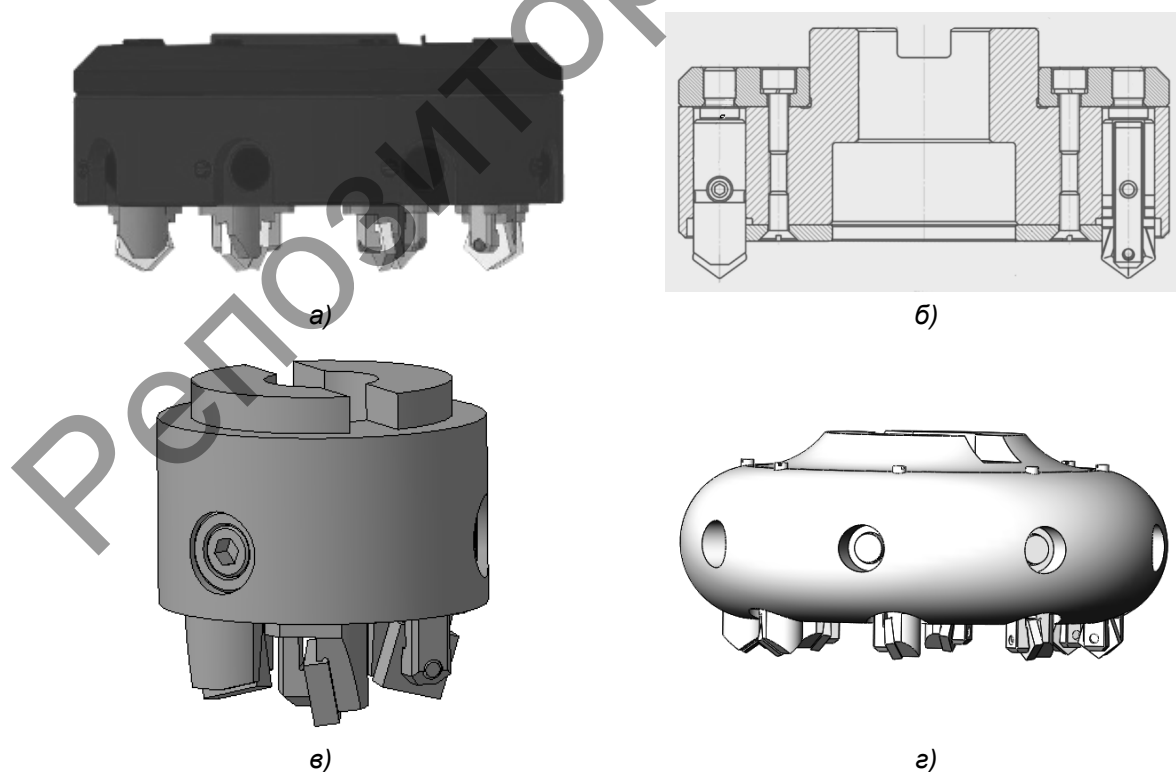
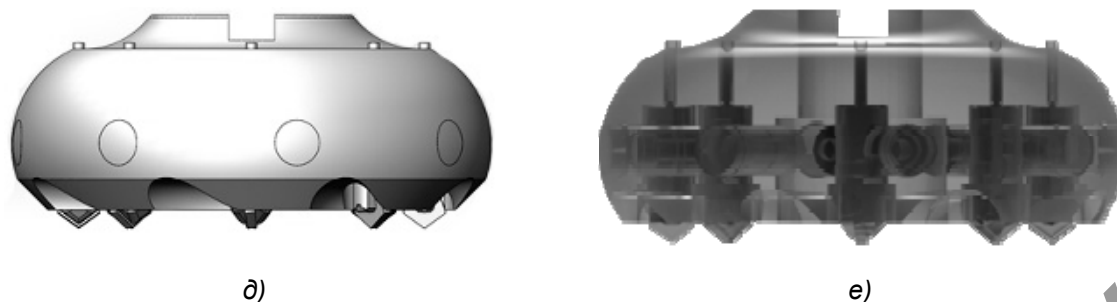


Рисунок 5. — Экспериментальные образцы: без стружкоотводящих канавок в форме диска (а и б), цилиндра (в), тора (д) и е) со стружкоотводящими канавками (д и е)



Окончание рисунка 5

В этих конструкциях предусмотрены различные формы корпусов, расположение и направление стружкоотводящих канавок на торце и периферии фрез с учетом вращения фрез по часовой стрелке. В частности, в конструкциях на рисунке 5, *а—г*, предусмотрен свободный сход стружки и подвод СОТС, определяемые только углом наклона режущей кромки лезвия, в конструкциях на рисунке 5, *д—е*, стружкоотводящие канавки выполнены на торцевой и периферийной поверхностях с рекомендованными значениями угла схода стружки  $\eta_c$ .

**Заключение.** В результате математического моделирования процессов отвода стружки и потоков СОТС установлены зависимости геометрических параметров режущих инструментов от механико-физических характеристик, режимов резания и аэрогидродинамических процессов.

Исходя из полученных зависимостей предложен следующий алгоритм расчета направлений схода стружки и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды (расположение стружкопотокоотводящих канавок):

1) исходя из заданных значений глубины резания, подачи и скорости резания определяются составляющие силы резания — главная  $P_z$ , радиальная  $P_y$ , осевая  $P_x$ , их соотношения  $P_y/P_z$ ,  $P_x/P_z$ ;

2) определяется нормальная сила  $N$  и угол наклона режущей кромки  $\lambda$ ;

3) определяется угол схода стружки  $\eta_c$  с учетом  $\lambda$  и  $N$ ;

4) рассчитывается скорость схода стружки  $v_c$  исходя из заданных значений скорости резания  $v$  и усадки стружки  $k$ ;

5) рассчитывается угол схода стружки  $\eta_c$  с учетом скорости схода стружки  $v_c$  и действующей силы  $N$ ;

6) рассчитываются значения изменений координаты  $\delta y$ , определяющие направление потока смазочно-охлаждающей технологической среды с учетом коэффициента вязкости среды  $\mu$ , площади поверхности режущей пластины  $S$ , контактирующей с технологической средой, линейной скорости потока (схода стружки) и силы сопротивления среды  $F$  (нормальной силы  $N$ );

7) полученные значения  $\eta_c$  и  $\delta y$  выбираются в качестве оптимальных, определяющих расположение стружкопотокоотводящих канавок в корпусе блочно-модульной фрезы.

#### Список цитируемых источников

1. Высокоскоростная обработка [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [www.insoftmach.ru/HSC.html](http://www.insoftmach.ru/HSC.html). — Дата доступа: 24.10.2017.

2. Бобров, В. Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В. Ф. Бобров. — М. : Машгиз, 1962. — 152 с.

3. Филиппов, Г. В. Режущий инструмент / Г. В. Филиппов. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1981. — 392 с.
4. Фрезы концевые с цилиндрическим хвостовиком : ГОСТ 17025-71. — Утв. и введ. постановлением Гос. ком. стандартов Совета Министров СССР от 09.06.1971 № 1104. — М. : Стандартиформ, 2005.
5. Фрезерный инструмент “Guhring” [Электронный ресурс]. — Режим доступа: docs.steelcam.org/guhring... frezernyj-instrument . — Дата доступа: 12.12.2020.
6. Попок, Н. Н. Деформация и стружкообразование при обработке плоских и криволинейных поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом на токарных и фрезерных станках с ЧПУ / Н. Н. Попок, В. А. Анисимов // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. В : Прикладные науки. Промышленность. — 2020. — № 10. — С. 28—34.
7. Трехмерное отрывное обтекание тел произвольной формы / С. М. Белоцерковский [и др.]. — М. : Центр. аэродинам. ин-т им. Н. Е. Жуковского, 2000. — 260 с.
8. Попок, Н. Н. Методология исследования работоспособности фрезерных и осевых режущих инструментов на основе 3D-прототипирования / Н. Н. Попок, С. А. Портянко // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. В : Прикладные науки. Промышленность. — 2020. — № 11. — С. 29—39.
9. Теплофизика и гидравлика в технологических системах нефтегазового оборудования : учебник / Р. Ю. Некрасов [и др.]. — Тюмень : ТюмГНГУ, 2014. — 172 с.

Поступила в редакцию 19.04.2021.