

# 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., Partianka 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., Vejera 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 621.926

**В. А. Дударев<sup>1</sup>, А. Д. Михальков<sup>2</sup>, В. С. Михальков<sup>2</sup>, Л. А. Сиваченко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Общество с ограниченной ответственностью «Домостроение», ул. Дубровенка Левая, д. 32, к. 33,  
212030 Могилев, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет», Министерство образования Республики Беларусь,  
пр-т Мира, 43, 212030 Могилев, Республика Беларусь

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ВИБРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦЫ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Рассмотрена область применения предлагаемой мельницы. Предложена конструкция вертикальной вибрационной мельницы для доизмельчения строительных материалов. Выполнен кинематический анализ приводного механизма. Построена математическая модель работы приводного механизма. Даны рекомендации конструктивного исполнения отдельных структурных элементов приводного механизма мельницы.

**Ключевые слова:** приводной механизм; эксцентриковый вал; помольная камера; кинематический анализ; математическая модель.

Рис. 3. Библиогр.: 4 назв.

**V. A. Dudarev<sup>1</sup>, A. D. Mikhalkov<sup>2</sup>, V. S. Mikhalkov<sup>2</sup>, L. A. Sivachenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Limited liability company “Domostroenie”, 32 Dubrovenka Levaya Str., k. 33,  
212030 Mogilev, the Republic of Belarus

<sup>2</sup>Interstate Educational Institution of Higher Education “Belarusian-Russian University”, Ministry of Education  
of Republic of Belarus, 43 Mira Ave., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus

### **INVESTIGATION OF THE OPERATION OF A VERTICAL VIBRATION MILL FOR GRINDING BUILDING MATERIALS**

The scope of application of the proposed mill is considered. The design of a vertical vibrating mill for grinding building materials is proposed. The kinematic analysis of the drive mechanism is performed. A mathematical model of the drive mechanism operation is constructed. Recommendations for the design of individual structural elements of the drive mechanism of the mill are given.

**Key words:** drive mechanism; eccentric shaft; grinding chamber; kinematic analysis; mathematical model.

Fig. 3. Ref.: 4 titles.

**Введение.** Измельчение является важнейшим технологическим процессом подготовки строительных материалов, который позволяет сделать материал химически активным и подготовить к химическому взаимодействию при возможной дальнейшей обработке, а также получить тонкодисперсный однородный по составу материал или гомогенную смесь разнородных материалов. В результате воздействия на материал существенно изменяются свойства получаемого продукта.

**Материалы и методы исследования.** На рисунке 1, а, представлена схема вертикальной вибрационной мельницы для доизмельчения строительных материалов. Вертикальная вибрационная мельница состоит из рамы 1 с установленным на ней электроприводом 3 с эксцентриковым валом 2, на концах которого подвешены две помольные камеры 4 посредством тяг 7. Помольные камеры соединены между собой коромыслом 6 с помощью шарнира 5.

Крутящий момент от электропривода передается на вал, через эксцентрики связанный с двумя помольными камерами 4, подвешенными на тягах 7. При работе мельницы камеры 4 с измельчаемым материалом и стальными шарами совершают колебательные движения вверх-вниз, металлические шары, находящиеся в камерах совместно с измельчаемым материалом, совершают хаотические движения. Прямолинейное движение помольных камер задано уравнением  $y = a \sin(kt + \beta)$ , описывающим гармоническое колебательное движение. Эксцентрики установлены так, что камеры находятся в противофазах: если левая камера вверху, то правая внизу.

На рисунке 2 представлена лабораторная установка вертикальной вибрационной мельницы.

Рассмотрим левую часть приводной системы вертикальной вибрационной балансирной мельницы, эксцентрик представим в виде кривошипа, а помольную камеру — ползуном.

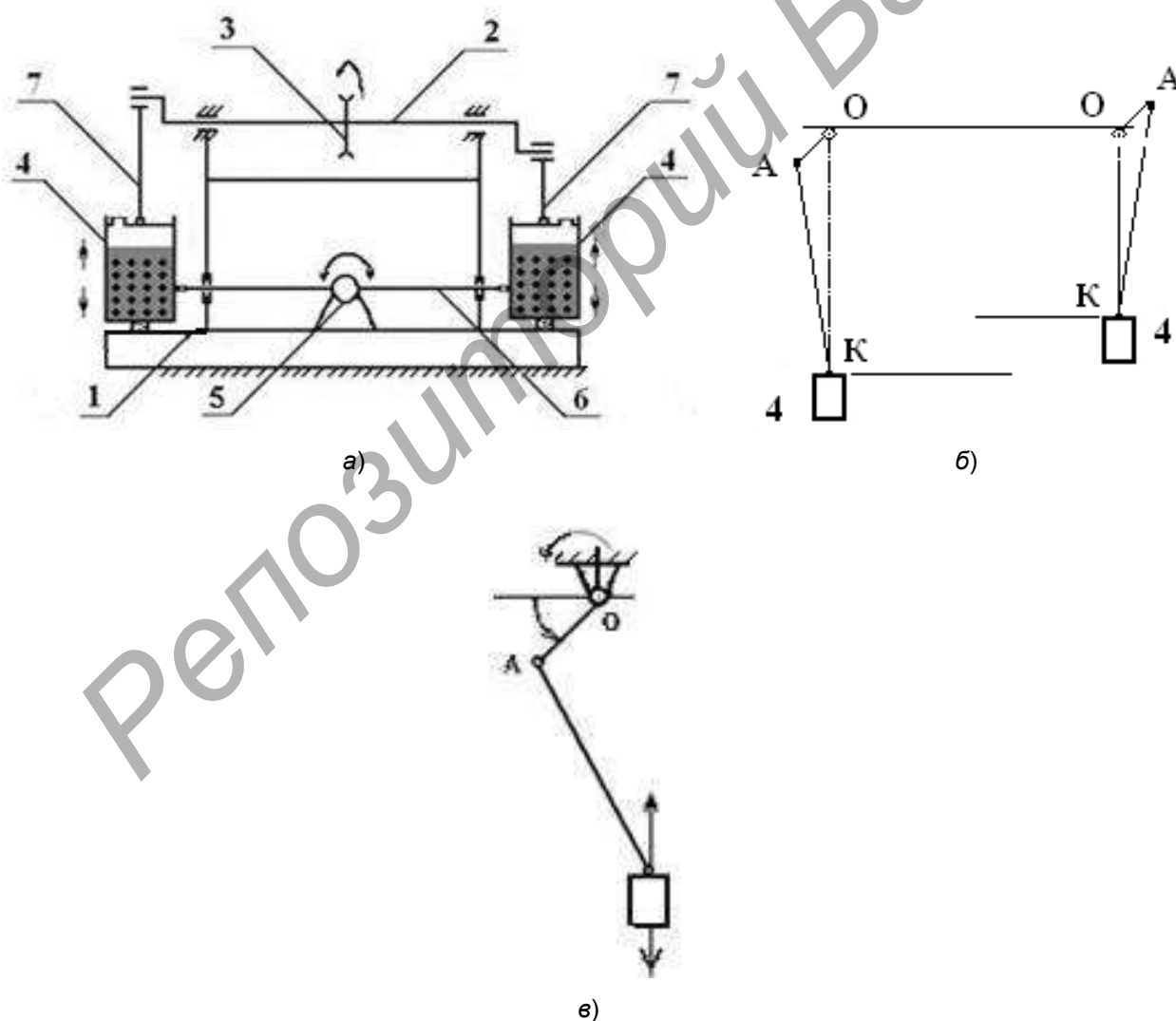


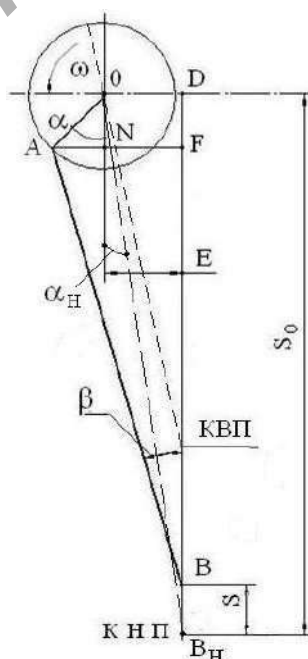
Рисунок 1. — Схема вертикальной вибрационной мельницы: принципиальная схема мельницы (а); кинематическая схема приводного механизма (б); один из двух одинаковых приводных механизмов (вид сбоку) (в)



**Рисунок 2. — Лабораторная установка вертикальной вибрационной мельницы**

Рассматриваемый приводной механизм — один из наиболее распространенных простых, надежных и жестких типов исполнительных механизмов, которые достаточно полно рассмотрены в многочисленных работах, например, в работах основоположников теории механизмов [1; 2]. В них рассмотрены задачи и методы анализа и синтеза этого механизма. Но в связи со спецификой использования в реальных конкретных конструкциях возникает необходимость проведения дополнительных исследований кинематических свойств подобных механизмов.

Рассмотрим основные кинематические характеристики эксцентрикового механизма, которые необходимы для его кинематического анализа. На рисунке 3 показана в рабочем положении схема приводного механизма вертикальной вибрационной мельницы для тонкого измельчения строительных материалов.



**Рисунок 3. — Расчетная схема приводного механизма мельницы в рабочем положении**

Приводной механизм содержит три подвижных звена, три вращательные и одну поступательную кинематические пары. Крайние положения механизма при крайнем верхнем и крайнем нижнем положениях помольной камеры показаны штриховой линией.

Цель настоящей работы — определение основных параметрических характеристик приводного механизма, необходимых для его анализа.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Воспользуемся методикой, изложенной в работах [3; 4], и введем следующие обозначения:  $R$  — радиус эксцентрика в текущий момент времени ( $OA = R$ );  $L$  — длина тяги, соединяющей помольную камеру с эксцентриком;  $E$  — смещение оси перемещения помольной камеры от вертикальной оси (эксцентриситет), или дезаксиал.

Эксцентриситет будем считать положительным, если он направлен в сторону вращения кривошипа в его нижнем положении, и отрицательным, если он направлен против вращения кривошипа.

Отметим еще два параметра, которые представляют собой относительные величины:

$\lambda = \frac{R}{L}$  — коэффициент шатуна и  $\varepsilon = \frac{E}{R}$  — степень эксцентриситета.

Пусть условие существования механизма  $R + |E| \leq L$  или в относительных единицах  $\lambda(1 + |\varepsilon|) \leq 1$ . Запишем значения относительных параметров  $\lambda$  и  $\varepsilon$  в связи с условиями существования механизма:

$$\lambda \leq \frac{1}{1 + |\varepsilon|}; \quad (1)$$

$$|\varepsilon| \leq \frac{1 - \lambda}{\lambda}. \quad (2)$$

Для случая равенства в выражениях (1) и (2) имеют место недопустимые углы давления, но работа приводного механизма практически невозможна. Текущее положение рычагов приводного механизма определяется углом  $\alpha$ , углом  $\beta$  и величиной  $S$ , вертикальное положение помольной камеры относительно крайнего нижнего положения.

Текущее положение помольной камеры зависит от угла  $\alpha$ , т. е.  $S = f(\alpha)$ . Вертикальное положение помольной камеры определяем по формуле

$$S = S_0 - R \cos \alpha - L \cos \beta, \quad (3)$$

где  $S_0 = \sqrt{(R + L)^2 - E^2}$ .

Из двух прямоугольных треугольников  $OAN$  и  $ABF$  определяем зависимость между углами  $\alpha$  и  $\beta$ :  $\sin \beta = \lambda(\sin \alpha + \varepsilon)$ , откуда можно определить угол  $\beta$ :  $\beta = \arcsin \lambda(\sin \alpha + \varepsilon)$ .

С учетом проведенных преобразований выражение (3) можно переписать в виде

$$S = R \left( \frac{\sqrt{(1 + \lambda)^2 - \varepsilon^2 \lambda^2}}{\lambda} - \cos \alpha - \frac{\cos \beta}{\lambda} \right). \quad (4)$$

Запишем неявную функцию  $\Phi(S, \alpha) = 0$  в виде  $\Phi(S, \alpha) = S - S_0 + R \cos \alpha + L \cos \beta$ .

Возьмем первую и вторую выражения (4) по координате  $\alpha$ :

$$\Pi' = \frac{\partial S}{\partial \alpha}; \quad \Pi'' = \frac{\partial^2 S}{\partial \alpha^2}.$$

Продифференцируем неявную функцию  $\Phi(S, \alpha) = 0$  по следующим формулам [5]:

$$\Pi' = \frac{\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha}}{\frac{\partial \Phi}{\partial S}}; \quad \Pi'' = \frac{\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2} + 2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha \partial S} \Pi' + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial S^2} \Pi'^2}{\frac{\partial \Phi}{\partial S}}.$$

Запишем частные производные:

$$\frac{\partial \hat{O}}{\partial S} = 1, \quad \frac{\partial^2 \hat{O}}{\partial S^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 \hat{O}}{\partial \alpha \partial S} = 0, \quad \frac{\partial \hat{O}}{\partial \alpha} = -R \sin \alpha - L \sin \beta \frac{d\beta}{d\alpha} = -R \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta},$$

$$\frac{\partial \hat{O}}{\partial \alpha} = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{\partial \hat{O}}{\partial \alpha} \right) = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( -R \sin \alpha - L \sin \beta \frac{d\beta}{d\alpha} \right) = -R \cos \alpha - L \cos \beta \left( \frac{d\beta}{d\alpha} \right)^2 - L \sin \beta \frac{d^2 \beta}{d\alpha^2}.$$

Продифференцируем выражение (3) по переменной  $\alpha$  и определим производные угла  $\beta$ :

$$\cos \beta \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} = \lambda \cos \alpha. \quad (5)$$

Преобразуем выражение (5):

$$\frac{\partial \beta}{\partial \alpha} = \lambda \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}; \quad \frac{\partial^2 \beta}{\partial \alpha^2} = \lambda \frac{d}{d\alpha} \left( \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \right) = \frac{-\lambda \sin \alpha}{\cos \beta} + \frac{\lambda^2 \sin \beta \cos^2 \alpha}{\cos^3 \beta}.$$

После преобразований

$$\Pi' = R \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}; \quad \Pi'' = R \left[ \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta} + \frac{\lambda \cos^2 \alpha}{\cos^3 \beta} \right].$$

Перемножим первую передаточную функцию на угловую скорость  $\omega$  ведущего звена, получим скорость движения помольной камеры в любой момент времени:

$$V = \omega \Pi' = \omega R \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}. \quad (6)$$

Перемножим вторую передаточную функцию на квадрат угловой скорости  $\omega$  ведущего звена с учетом того, что она постоянна, получим ускорение помольной камеры:

$$J = \omega^2 \Pi'' = \omega^2 R \left[ \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta} + \frac{\lambda \cos^2 \alpha}{\cos^3 \beta} \right]. \quad (7)$$

Выражения (4), (6) и (7) являются точными формулами для определения кинематических характеристик приводного эксцентрикового механизма вертикальной вибрационной мельницы.

**Заключение.** Полученные формулы однозначно определяют кинематические характеристики дезаксиального кривошипно-ползунного механизма вертикальной вибрационной мельницы.

#### Список цитируемых источников

1. *Левитский, Н. И.* Теория механизмов и машин / Н. И. Левитский. — М. : Наука, 1979. — 576 с.
2. *Артоболевский, И. И.* Теория машин и механизмов / И. И. Артоболевский. — М. : Наука, 1988. — 640 с.
3. *Семенов, М. В.* Кинематические и динамические расчеты исполнительных механизмов / М. В. Семенов. — Л. : Машиностроение, 1974. — 432 с.
4. Кинематические характеристики дезаксиального кривошипно-ползунного механизма / А. В. Явтушенко [и др.] // Вісн. Кременчуц. держ. політехн. ун-ту ім. М. Остроградського. — Кременчук : КДТУ, 2009. — Вип. 6/2009 (59, ч. 2). — С. 94—99.

Поступила в редакцию 30.04.2021.

Репозиторий БарГУ

УДК 539.19(075.8):621.317.421

**А. В. Клочков, А. А. Емельяненко, К. С. Федосов**

Учреждение образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,  
Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, ул. Мичурина, 5,  
213407 Горки, Республика Беларусь, +375 (22) 335 93 83, olena\_k@tut.by

## ПАРАМЕТРЫ ИНДУКЦИИ ПРИ ОБЪЕМНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ МАГНИТОВ

Магнитная индукция является силовой характеристикой магнитного поля и определяет в данной точке пространства его действие на движущиеся относительно данного магнитного поля заряженные частицы и тела, включая биологические объекты. Она определяет способность влиять на объект с помощью магнитного поля. Магнитные поля, ориентированные в одном направлении, не нейтрализуют друг друга, а складываются, формируя единое поле.

Максимальная величина магнитной индукции в исследованных вариантах наблюдается на расстоянии 20 мм от центра магнита и распространяется на 50—70 мм, но уже на расстоянии 30 мм от плоскости магнита величина индукции снижается в среднем в 5 раз.

В зонах предполагаемого воздействия магнитного поля целесообразно использовать встречную направленность ( $S : N$ ) полюсов магнитов. Одинаковая ориентация магнитных полюсов сопровождается существенным снижением магнитной индукции в зоне взаимодействия.

**Ключевые слова:** магниты; магнитная индукция; взаимодействие магнитных полей.

Рис. 6. Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.

**A. V. Klochkov, A. A. Emelianenko, K. S. Fedosov**

Educational Institution “Belarusian State Agricultural Academy”, the Ministry of Agriculture and Food  
of the Republic of Belarus, 5 Michurina Str., 213407 Gorki, the Republic of Belarus,  
+375 (22) 335 93 83, olena\_k@tut.by

## INDUCTION PARAMETERS BY THE THREE-DIMENSIONAL ARRANGEMENT OF MAGNETS

Magnetic induction is a force characteristic of a magnetic field and determines its impact on charged particles and bodies (biological objects included) moving relative to a given magnetic field at a given point in space. It determines the ability to influence an object by a magnetic field. Magnetic fields oriented in one direction do not neutralize each other, but add up to form a single field.

The maximum value of magnetic induction in the variants under consideration is observed at a distance of 20 mm from the center of the magnet and extends to 50...70 mm, but already at a distance of 30 mm from the surface of the magnet, the value of induction decreases by 5 times on average.

In the areas of expected magnetic field exposure, it is advisable to use the opposite direction ( $S : N$ ) of the magnet poles. The same orientation of the magnetic poles is accompanied by a significant decrease in the magnetic induction in the interaction zone.

**Key words:** magnets; magnetic induction; interaction of magnetic fields.

Fig. 6. Table 1. Ref.: 11 titles.

**Введение.** Магнитные технологии перспективны для применения в различных областях деятельности. Особенный интерес представляет реализация потенциала магнитного воздействия в сельском хозяйстве на семена и растения. Значительные перспективы имеет использование искусственных магнитных полей, под действием которых многие биологические объекты и вещества изменяют свои характеристики.

Под действием искусственного магнитного поля может значительно ускориться рост растений [1—5]. Существуют предположения о возможности уменьшения пораженности семян и растений плесневыми грибами, об отпугивающем действии магнитного поля на вредителей сельскохозяйственных культур.

Многими исследователями доказано, что в результате воздействия магнитных полей на растения происходит стимуляция обменных процессов, что приводит к повышению интенсивности их роста и развития [5—7].

Технические устройства для осуществления магнитных воздействий на сельскохозяйственные объекты могут иметь различную конструкцию [8]. Они могут непосредственно воздействовать на биологические объекты или передавать свое влияние через поливную воду, рабочие жидкости пестицидов, растворы удобрений.

При этом остается недостаточно изученным потенциал получаемых магнитных полей при различном расположении магнитов относительно зоны предполагаемого технологического воздействия.

Вопросы распространения индукции магнитного поля при изолированном расположении магнитов рассматривались нами ранее [9—11]. Однако представляет перспективный интерес вариант объемного расположения магнитов в различных сочетаниях в целях выявления максимальных значений создаваемой магнитной индукции.

**Материалы и методы исследования.** Измерения проводили с использованием приборов ИМП-1 и ИОН-3 (измерители магнитной индукции производства ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»). Прибор для измерения магнитной индукции ИМП-1 оснащен тремя взаимно ортогональными датчиками Холла и предназначен для измерения трех компонент и модуля индукции постоянных магнитных полей.

Цифровой магнитометр — измеритель остаточной намагниченности ИОН-3 — применяется для широкого спектра задач, где необходимо определение индукции магнитного поля и остаточной намагниченности: деталей и заготовок после размагничивания, намагниченных в процессе магнитопорошковой дефектоскопии или при шлифовке, при разгрузке магнитной шайбой, для определения намагниченности счётчиков воды, газа, а также иных задач.

В ходе опытов определяли магнитную индукцию в окружающем пространстве вокруг кольцевых ферритовых магнитов со следующими размерами, мм (наружный диаметр × внутренний диаметр × толщина):  $75 \times 28 \times 13$  — для использования в системах орошения;  $60 \times 23 \times 8$  — для омагничивания воды в опрыскивателях;  $22 \times 12 \times 5$  — для капельного орошения.

Для исследования магнитного поля отдельных магнитов использовали простейший пространственный координатор, в центр которого помещали исследуемые магниты (рисунок 1), затем измеряли нормальную и тангенциальную составляющие магнитной индукции (мТл).

**Результаты исследования и их обсуждение.** Исходные условия воздействия магнитного поля на объект определяются распространением магнитных полей от отдельных магнитов. Индукция магнитного поля, как показали результаты измерений, изменяется по ширине исследуемых кольцевых ферритовых магнитов (рисунок 2).

Максимальное значение модуля магнитной индукции в исследованных вариантах наблюдается на расстоянии около 20 мм от центра магнита. Отмечаются аналогичные закономерности изменения нормальной и тангенциальной составляющих при действии обоих полюсов —  $S$  и  $N$ .



Рисунок 1. — Измерение магнитных полей с использованием пространственного координатора и магнитометров

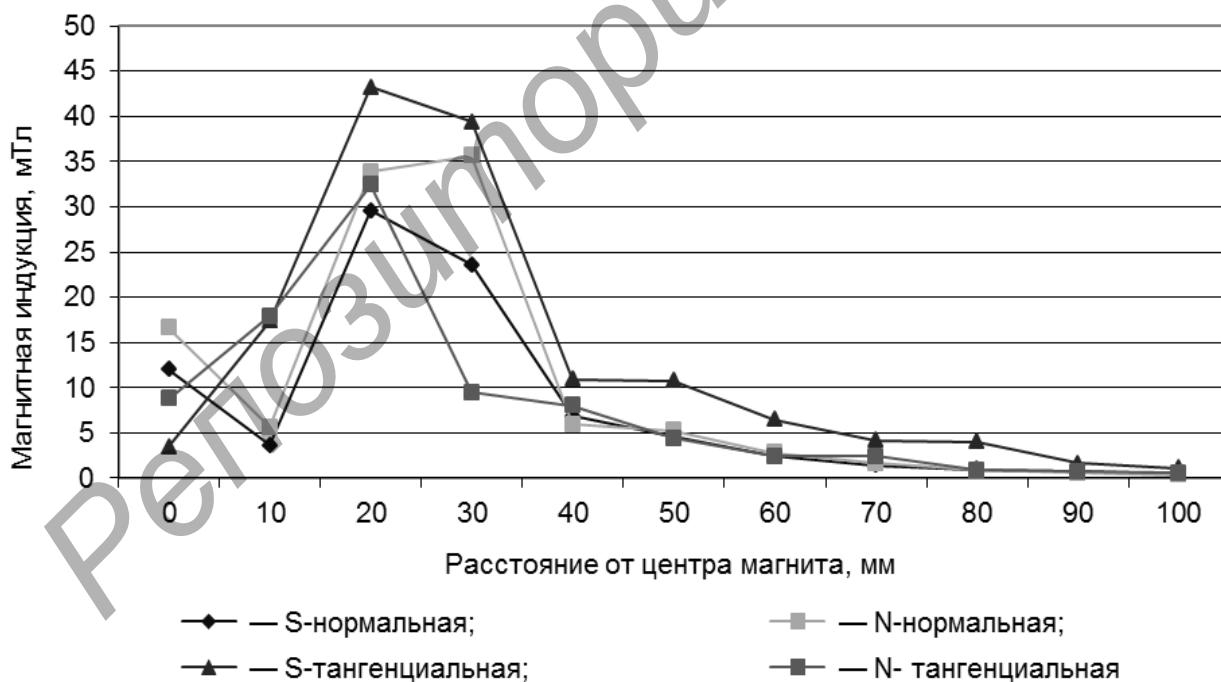


Рисунок 2. — Параметры нормальной и тангенциальной составляющей магнитной индукции по ширине магнита (наружный диаметр — 60 мм, внутренний диаметр — 23 мм)

С удалением от плоскости магнита наблюдаемые параметры магнитной индукции закономерно уменьшаются (рисунок 3). Так, на расстоянии 30 мм от плоскости магнита индукция снижается в 4,4...5,9 раза (в среднем в 5 раз).

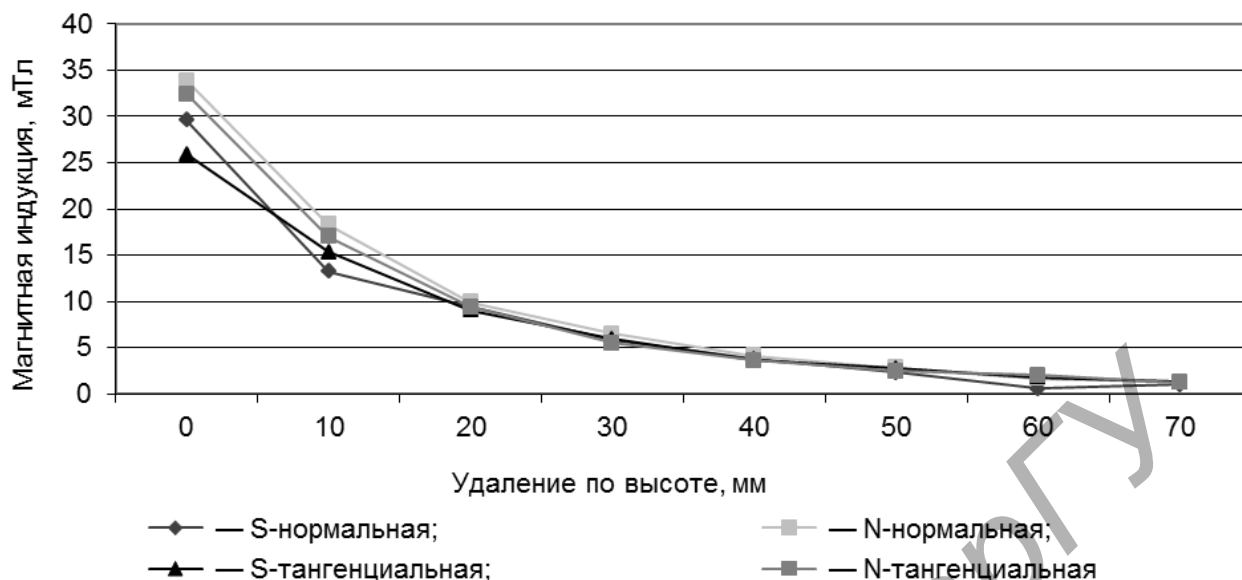


Рисунок 3. — Параметры нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции с удалением от магнита (наружный диаметр — 60 мм, внутренний диаметр — 23 мм, удаление от оси — 20 мм)

Возможным является линейное расположение магнитов в одной плоскости. Распространение индукции в этом случае сопровождается взаимодействием магнитных полей, особенно проявляющимся в точках соприкосновения магнитов (рисунок 4).

В данном опыте индукция магнитного поля измерялась прибором ИОН-3. Независимо от очередности чередования полюсов вблизи поверхности магнитов индукция увеличивается до 58,0...75,1 мТл, тогда как среднее значение по участку замеров составляло 19,8...22,4 мТл. С удалением от плоскости магнитов на 25 мм картина взаимодействия проявляется еще более четко, но максимальное значение индукции снижается до 7,2...8,2 мТл.

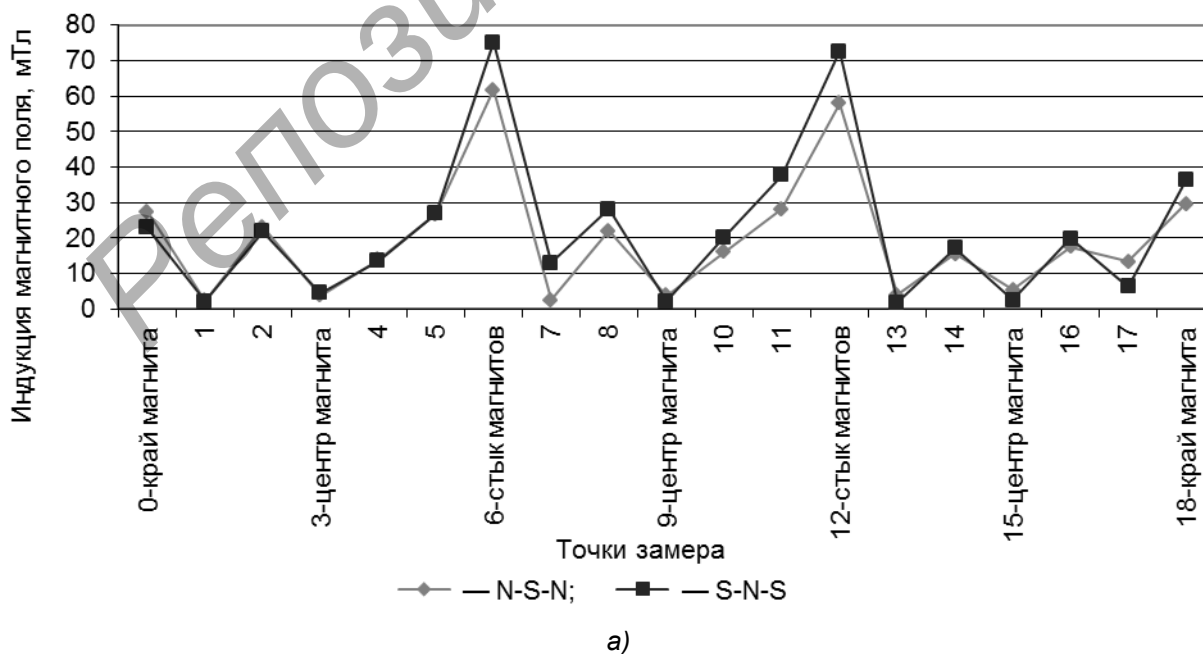
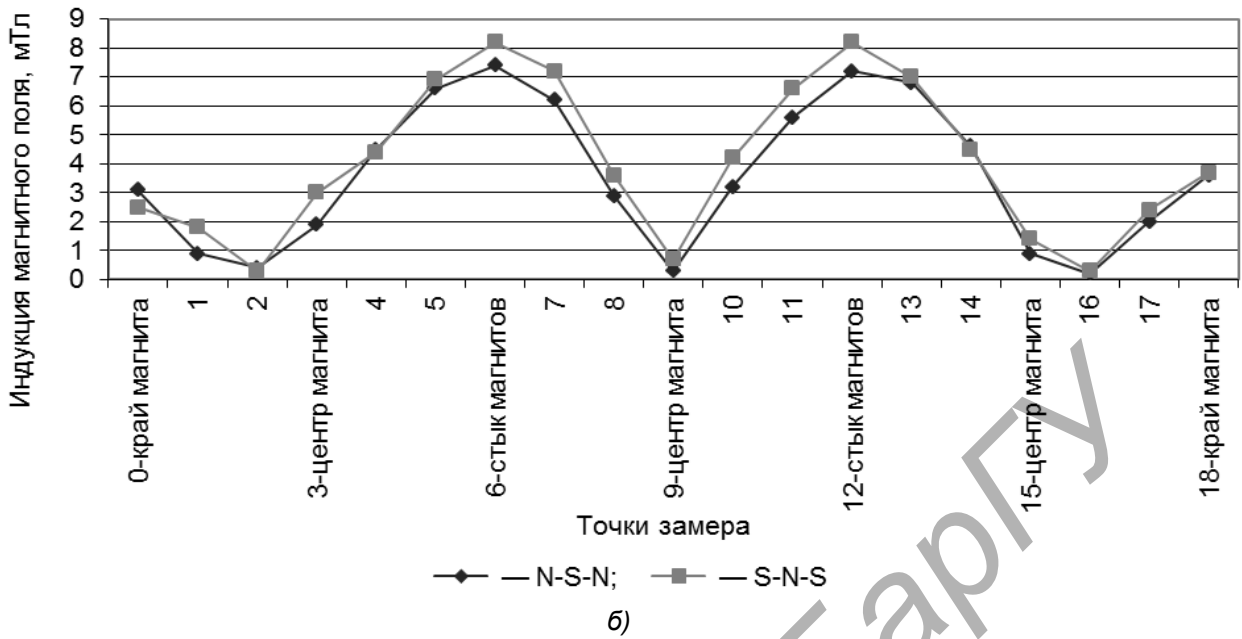


Рисунок 4. — Изменение магнитной индукции при линейном расположении трех магнитов вблизи поверхности (а) и на расстоянии 25 мм (б)



Окончание рисунка 4

Среди возможных вариантов расположения магнитов рассмотрена их установка на трубчатой оси с возможностью подачи омагничиваемого материала внутри такой трубы из немагнитизируемого материала. Исследовали два варианта: согласное расположение магнитов ( $S-N : S-N$ ) и встречное, при котором соседние магниты расположены друг к другу одноименными полюсами ( $S-N : N-S$  и  $N-S : S-N$ ). Исследования показали своеобразную картину взаимодействия, которая в значительной степени зависит от ориентации магнитов (рисунок 5).

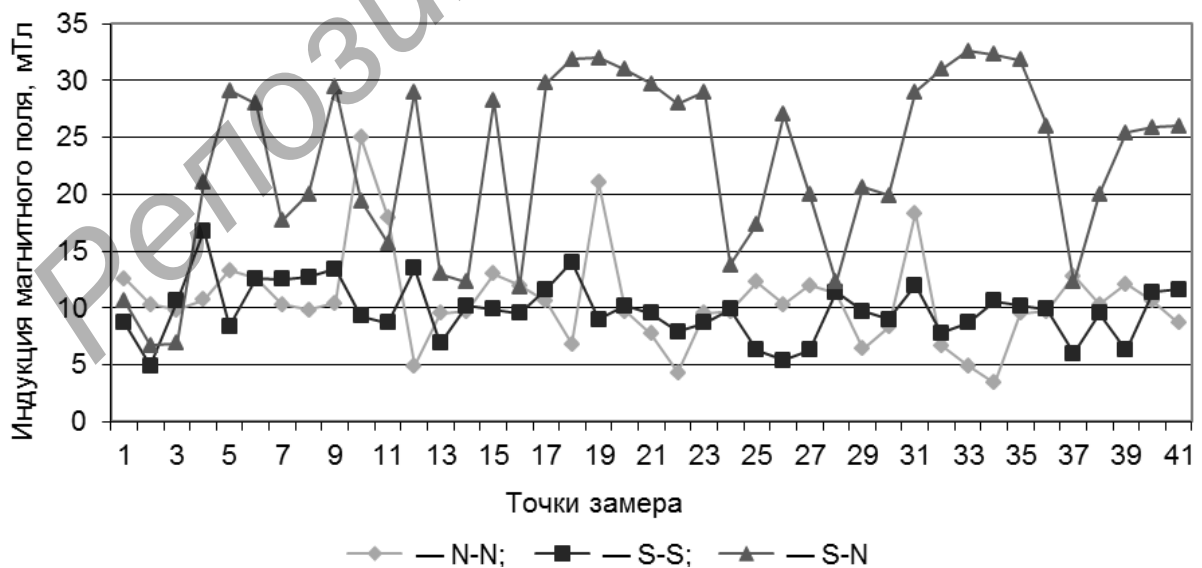


Рисунок 5. — Изменение индукции магнитного поля внутри трубы из немагнитизируемого материала с насаженными кольцевыми магнитами

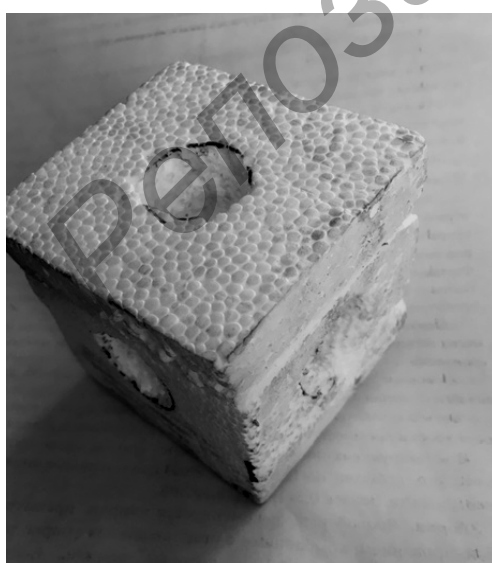
Полученные данные показывают, что при встречной ориентации магнитных полей отдельных магнитов (схема  $N-S : S-N$ ) индукция снижается и составляет в среднем 9,8...10,7 мТл, тогда как при согласной ориентации (схема  $N-S : N-S$ ) возрастает до 22,8 мТл. Это убедительно доказывает целесообразность использования в технологическом пространстве возможных омагничивающих устройств магнитов с согласной ориентацией, при которой магниты направлены разноименными полюсами.

Для определения магнитной индукции при пространственном расположении магнитов предложена и исследована физическая модель взаимодействий магнитных полей с расположением магнитов на внешних поверхностях куба (рисунок 6). В соответствии с данными о зонах действия магнитной индукции исследованных магнитов длина ребра куба, изготовленного из пенопласта, была принята равной 70 мм. Объемное действие магнитных полей изучалось и оценивалось при различных вариантах размещения магнитов (таблица 1).

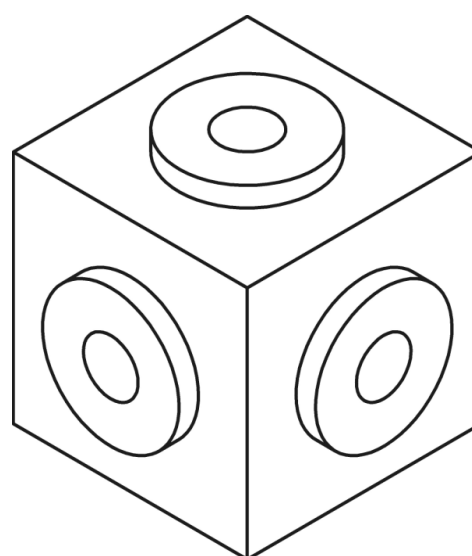
Измеренные значения магнитной индукции зависят от расположения датчика, причем более высокие показания были отмечены при расположении датчика в горизонтальной плоскости.

Полученные данные характеризуют сложный характер взаимодействия магнитных полей при различной пространственной ориентации полюсов магнитов. Минимальные значения магнитной индукции отмечаются при встречном положении полюсов  $S$ -магнитов, расположенных соосно (схема  $N-S : S-N$ ). При встречном положении полюсов  $N$  (схема  $S-N : N-S$ ) особенно сильно проявляется снижение магнитной индукции при установке магнитов по данной схеме по всем трем осям. Максимальные суммарные показания (28,13...33,20 мТл) зафиксированы при использовании 4 или 6 магнитов при чередовании расположения полюсов  $S$  и  $N$  по окружности.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о целесообразности использования в зонах предполагаемого воздействия магнитных полей согласной направленности (схема  $N-S : N-S$ ), что приводит к объединению их магнитных полей. Ориентация магнитных полей в зоне взаимодействия по схемам  $S-N : N-S$  или  $N-S : S-N$  сопровождается существенным снижением магнитной индукции из-за встречного положения магнитных полей отдельных магнитов и их взаимного ослабления.













а)



б)

Рисунок 6. — Каркас из пенопласта кубической формы (а) и схема размещения магнитов на его гранях (б)

Таблица 1. — Параметры магнитной индукции (мТл) внутри полости куба при различных вариантах расположения магнитов (в среднем по трем измерениям)

Схема расположения магнитов	Положение датчика				Модуль магнитной индукции, мТл
	горизонтальное		вертикальное		
	нормальная составляющая	тангенциальная составляющая	нормальная составляющая	тангенциальная составляющая	
	11,83	2,13	0,80	0,01	14,77
	0	0,09	0,87	0,73	1,69
	1,87	2,50	0,60	2,67	7,64
	0,83	0	2,97	0	3,80
	0	0	0,33	1,50	1,83
	0,27	0	0,90	0	1,17
	8,63	8,33	4,87	1,63	23,46
	8,27	12,20	3,20	9,53	33,20
	9,30	9,20	1,83	7,80	28,13
	8,80	0	1,80	3,27	13,87

**Вывод.** Магнитная индукция является силовой характеристикой магнитного поля и определяет в данной точке пространства его действие на движущиеся относительно данного магнитного поля заряженные частицы и тела, включая биологические объекты. Она определяет способность влиять на объект с помощью магнитного поля. Магнитные поля, ориентированные в одном направлении, не нейтрализуют друг друга, а складываются, формируя единое поле.

Максимальная величина магнитной индукции в исследованных вариантах наблюдается на расстоянии 20 мм от центра магнита и распространяется на расстояние 50...70 мм, но уже на расстоянии 30 мм от плоскости магнита величина индукции снижается в среднем в 5 раз.

В зонах предполагаемого воздействия магнитного поля при ортогональном расположении магнитов целесообразно использовать согласную направленность магнитов, находящихся на одной оси ( $S-N : S-N$ ). Встречная ориентация магнитных полей отдельных магнитов приводит к существенному снижению магнитной индукции в зоне взаимодействия с объектом обработки.

## Список цитируемых источников

1. *Новицкий, Ю. И.* Магнитное поле в жизни растений / Ю. И. Новицкий ; под ред. А.Т. Епринцева. — Воронеж : Центр.-чернозем. книж. изд-во, 2002. — Вып. 17. — С. 8—19.
2. *Кефели, В. И.* Рост растений / В. И. Кефели. — М. : Колос, 1973. — 120 с.
3. *Новицкий, Ю. И.* Магнитные поля в жизни растений / Ю. И. Новицкий // Проблемы космической биологии. — М. : Наука, 1973. — Т. 18. — С. 164—178.
4. *Новицкий, Ю. И.* Параметрические и физиологические аспекты действия постоянного магнитного поля на растения : дис. ... д-ра биол. наук / Ю. И. Новицкий. — М., 1985. — 339 л.
5. *Новицкий, Ю. И.* Реакция растений на магнитные поля / Ю. И. Новицкий. — М. : Наука, 1978. — С. 119—130.
6. *Азарова, Е. П.* К механизму действия магнитного поля на семена / Е. П. Азарова, А. П. Салей // Проблемы интродукции и экологии Центрального Черноземья. — Воронеж, 1997. — С. 107—109.
7. *Барышев, М. Г.* Влияние электромагнитного поля на биологические системы растительного происхождения / М. Г. Барышев. — Краснодар : Куб. гос. ун-т, 2002. — 297 с.
8. *Классен, В. И.* Вода и магнит / В. И. Классен. — М. : Наука, 1973. — 112 с.
9. *Клочков, А. В.* Проращивание семян в магнитном поле / А. В. Клочков, О. С. Клочкова, О. Б. Соломко // Вестн. БГСХА. — 2020. — № 3. — С. 163—168.
10. *Клочков, А. В.* Возможности применения омагниченной поливной воды / А. В. Клочков, О. Б. Соломко, А. А. Емельяненко // Эффективность применения инновационных технологий и техники в сельском и водном хозяйстве : сб. науч. тр. — Бухара, 2020. — С. 162—164.
11. *Клочков, А. В.* Параметры магнитного поля в устройствах омагничивания воды / А. В. Клочков, О. Б. Соломко, А. А. Емельяненко // Агропанорама. — 2020. — № 5 (141). — С. 23—28.

Поступила в редакцию 01.03.2021.

УДК 621.98.044.7

А. М. Милюкова<sup>1</sup>, А. Н. Матяс<sup>1</sup>, А. А. Лях<sup>1</sup>, А. И. Горчанин<sup>1</sup>, О. А. Толкачева<sup>1</sup>, Хан Цзинь<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 267 60 10  
<sup>2</sup>Пекинский институт авиационных материалов, пр-т Авиационных материалов, 8, 100095 Пекин, Китайская Народная Республика, priemnaya@phti.by, annart@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПОСЛЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Проведены исследования физико-механических свойств титанового сплава (температура, твердость, остаточные напряжения) после магнитно-импульсной обработки при различных режимах. Показано, что магнитно-импульсное воздействие при определенных оптимальных режимах позволяет улучшить физико-механические свойства исследуемого сплава.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка; энергия; импульс; упрочнение; физико-механические свойства.

Рис. 6. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

А. М. Milyukova<sup>1</sup>, А. N. Matyas<sup>1</sup>, А. А. Liakh<sup>1</sup>, А. I. Gorchanin<sup>1</sup>, О. А. Tolkacheva<sup>1</sup>, Han Jin<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>State Scientific Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”,  
10 Kuprevich Str., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 267 60 10,  
<sup>2</sup>Beijing institute of Aviation materials, 8 Aviation materials Ave., 100095 Beijing, China,  
priemnaya@phti.by, annart@mail.ru

## IMPROVEMENT OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY BY MAGNETIC-PULSE TREATMENT

Strength properties were studied (temperature, hardness, residual stresses) after magnetic-pulse treatment under various conditions. It is shown that the magnetic-pulse effect under certain optimal conditions can improve the physical-mechanical properties of the studied alloy.

**Key words:** magnetic pulse processing; energy; impulse; hardening; physical and mechanical properties; microstructure.

Fig. 6. Table 1. Ref.: 7 titles.

**Введение.** Целью работы является исследование и определение параметров воздействия сильного импульсного магнитного поля (далее — ИМП), обеспечивающих улучшение физико-механических свойств титанового сплава ТС4 (Ti-6Al-4V).

Механические свойства металлических сплавов определяются химическим составом материала, твердостью, микротвердостью, структурными и фазовыми превращениями, величиной, знаком и глубиной остаточных напряжений, деформацией кристаллической решетки.

Учеными и специалистами Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси (ФТИ, Минск) и Барановичского государственного университета (БарГУ, Барановичи) успешно развивается новое для Республики Беларусь научное направление — магнитно-импульсная упрочняющая обработка (далее — МИО) поверхностей изделий из стали и сплавов. При воздействии МИО на стали устраняются дефекты в их кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла в поверхностном слое, что снижает трещинообразование, стабилизи-

рует структуру, обеспечивает повышение прочности изделий и, соответственно, увеличивает их срок эксплуатации [1].

Уже накоплен достаточный экспериментальный и научный опыт применения сильного импульсного электромагнитного поля для повышения периода работоспособности различных изделий (инструментов), применяемых в дерево- и металлообрабатывающей, машиностроительной, авиаремонтной и пищевой отраслях промышленности как на предприятиях Республики Беларусь, так и за рубежом [2; 3].

К упрочнению поверхности стальных изделий под воздействием электромагнитного импульса приводят поверхностные деформации, уплотнение структуры вблизи поверхности, а также фазовые превращения аустенита в мартенсит, миграции примесей вблизи границ зерен, возникновение мелкодисперсной структуры на поверхности, связанное с образованием новых границ между зернами и дроблением пластинок цементита [3—5]. Эти процессы связаны с неоднородностью материала стали и локальным выделением теплоты вблизи границ зерен, а также в местах различных дефектов при протекании индукционных токов, а также магнитострикционными эффектами (в случае изделий, выполненных из магнитных сталей) [3].

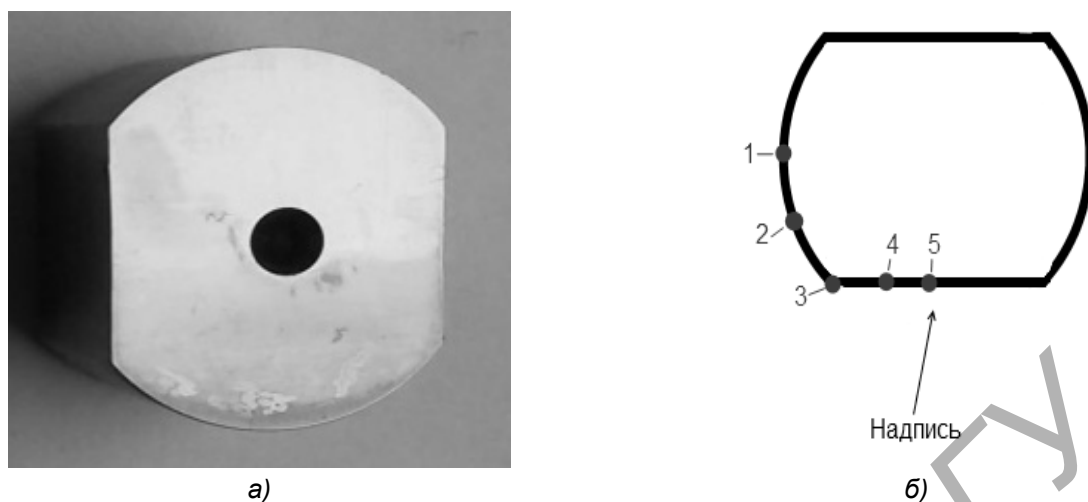
В случае с титановыми сплавами, которые имеют низкую удельную электропроводность и не имеют магнитных фаз, эти эффекты неочевидны, изменения свойств менее заметны. Структура и свойства поверхностного слоя должны изменяться под воздействием образующегося давления.

Известно, что при исследовании предела текучести у большинства титановых сплавов его приходится измерять условно по заданной остаточной деформации ( $\sigma_{0,1}$  или  $\sigma_{0,2}$ ), так как «физический» предел текучести, или «зуб текучести», на диаграмме растяжения редко выявляется. Сопrotивление малым пластическим деформациям (предел текучести, предел пропорциональности и предел упругости) у титановых сплавов оказывается очень чувствительным к микроструктуре (величине зерна) и скорости нагружения. Титан уже при комнатной температуре имеет ползучесть при напряжениях, заметно более низких, чем предел текучести. Известно, что у титана выявлена заметная разница между пределами пропорциональности и упругости, причем определяемый предел упругости в отличие от стали бывает всегда ниже предела пропорциональности, который является более устойчивой величиной. В связи с этим весьма затруднительно определение таких свойств, как предел пропорциональности и упругости.

На механические свойства титановых сплавов существенное влияние оказывают присутствующие основные и легирующие элементы, а также технологические примеси ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ).  $O_2$  и  $N_2$  являются элементами внедрения и сильнейшими упрочнителями: каждая десятая доля процента кислорода повышает прочность примерно на 130 МПа, а азот действует еще сильнее, однако при этом они снижают пластичность и вязкость, придавая хрупкость титановому сплаву [6].

**Материалы и методы исследования.** Титан относится к парамагнетикам — материалам, имеющим слабую проводимость электрического тока, теплопроводность при 20 °С 8,37 Вт / (м · град) и низкую магнитную проницаемость. Он не притягивается к магниту, как железо, и не выталкивается, как медь. Эти свойства титановых сплавов должны снижать их восприимчивость к МИО.

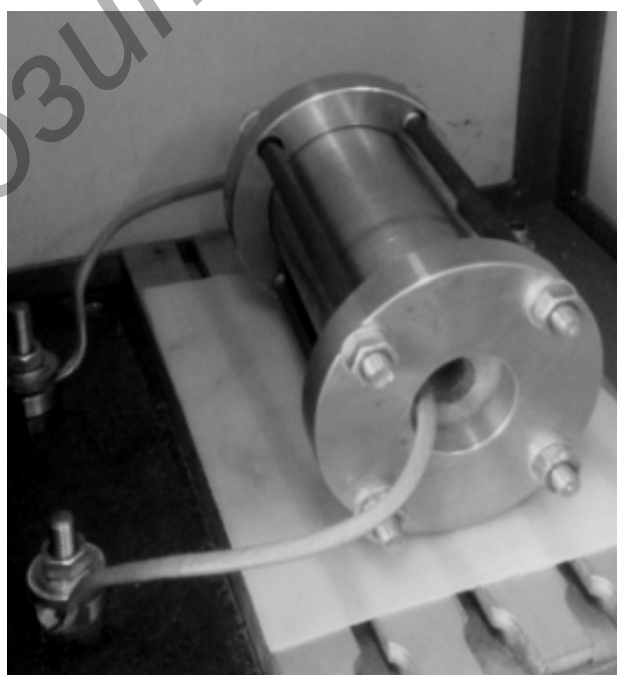
Исследования физико-механических свойств титанового сплава (температура, твердость, остаточные напряжения) после МИО при различных режимах проводили следующим образом. Экспериментальные образцы титанового сплава TC4 (Ti-6Al-4V), применяемого для производства лопаток авиадвигателя, изготовлены из прутка по комплексной технологии, включающей механическую и термическую обработку, и имеют диаметр 20 мм с параллельными плоскостями по бокам (рисунок 1, а). Из образцов изготовили шлифы (см. рисунок 1, б) для исследования механических свойств при различных технологических режимах МИО.



**Рисунок 1. — Экспериментальный образец сплава TC4: а — внешний вид шлифа; б — схема измерения микротвердости HV шлифованных образцов из титанового сплава TC4**

Исследуемые образцы диаметром 20 мм изготовлены в виде шлифов, полированных на одной поверхности. Для надежного измерения твердости две противоположные боковые поверхности срезаны и выполнены параллельными. На одной из них нанесена надпись — маркировка образца.

Образцы сплава TC4 для осуществления МИО располагали в ИМП, создаваемом в цилиндрическом индукторе (рисунок 2) таким образом, чтобы линии индукции были перпендикулярны полированной стороне образца и пронизывали ее. Геометрия ИМП не изменялась во всех экспериментах.



**Рисунок 2. — Индуктор цилиндрический для МИО цилиндрических образцов и изделий**

**Результаты исследования и их обсуждение.** Результаты исследований до и после МИО некоторых свойств образцов сплава ТС4 представлены в таблице 1.

Анализ данных, представленных в таблице 1, показал, что начальная твердость *HRC* поверхности образцов составила в среднем 30...34, после МИО она не изменилась.

После проведения МИО образцов ТС4 на установке МИУ-3 с низкой частотой воздействия при разных технологических режимах с энергией воздействия от 8 до 13 кДж после извлечения из индуктора зафиксировано максимальное повышение температуры поверхности образца Т8 до 60 °С при энергии воздействия 9 кДж. После проведения МИО образцов на установке с высокой частотой МИП-18 и высокими токами с различной энергией воздействия (от 6 до 10 кДж) максимальное повышение температуры поверхности образца Т19 при энергии воздействия 8 кДж составило 69 °С, что свидетельствует о том, что под воздействием ИМП, создаваемого МИП-18, образцы нагреваются сильнее при меньшей энергии воздействия.

Микротвердость *HV* при нагрузке на индентор 100 г измеряли на поверхности шлифа по пяти точкам, как показано на рисунке 1. Точки измерения находятся на различном расстоянии от спирали индуктора, создающего ИМП. Результаты этих измерений представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1. — Свойства образцов титанового сплава до и после МИО

Маркировка образца титанового сплава ТС4	Температура нагрева образца при МИО после 1/2/3 или 2/4/6 импульсов, Т°	Твердость, <i>HRC</i>	Микротвердость <i>HV</i> , МПа		Суммарное остаточное напряжение, МПа		
			начальное значение <i>HV</i> <sub>0</sub>	значение <i>HV</i> после МИО	начальное значение	значение после МИО	разница
Т2	28/38/48	33...34	2 930...3 590	3 400...3 600	1 675	1 675	0
Т3	28/48/56	33...34	2 926...3 592	3 400...3 600	2 260	2 260	0
Т4	28/48/56	33...34	3 318...3 497	3 150...3 690	2 065	1 915	-150
Т5	28/38/48	30...34	3 406...3 690	2 320...2 790	1 607	1 657	50
Т6	48/51/60	30...31	3 230...3 795	2 930...3 590	1 326	1 319	-7
Т7	28/45/52	33...34	3 230...3 795	3 400...3 800	1 935	1 805	-130
Т8	40/50/60	33...34	3 400...3 690	3 400...3 690	2 001	2 066	65
Т9	41/49/54	30...32	3 320...3 500	3 400...3 690	1 674	1 739	65
Т10	20/34/45	33...34	3 000...3 150	2 226...2 600	1 674	1 870	196
Т11	20/30/44	33...34	3 320...3 500	2 483...2 723	2 262	2 066	-196
Т12	20/30/44	31...33	3 690...4 015	2 540...2 926	2 066	1 870	-196
Т13	20/30/44	33...34	3 074...3 600	2 226...3 000	1 609	2 001	392
Т14	22/34/46	33...34	3 320...3 600	2 324...3 073	1 543	2 001	458
Т15	22/34/46	32...34	3 230...3 600	2 430...3 073	1 674	1 674	0
Т16	25/50/67	33...34	3 074...3 500	2 274...2 660	2 132	2 132	0
Т17	30/40/52	33...34	3 320...3 500	2 135...2 660	1 609	1 609	0
Т18	30/44/58	32...34	3 320...4 015	2 324...2 855	1 870	1 805	-65
Т19	32/53/69	33...34	3 320...3 500	2 788...3 406	2 066	2 262	196

Количественно эффект влияния ИМП характеризовался относительным изменением средней микротвердости по пяти точкам [7]:

$$Q = \frac{HV - HV_0}{HV_0},$$

где  $HV_0$  — исходное среднее значение микротвердости пяти точек образца (МПа);

$HV$  — среднее значение микротвердости пяти точек поверхности образца, подвергнутого МИО (МПа).

Расчеты показали, что относительное изменение средних значений микротвердости поверхности некоторых образцов (Т2, Т3, Т4, Т7, Т8, Т9) почти не изменилось или повысилось на 4,5 %, остальных образцов — понизилось от 6 до 27 %.

Таким образом, установлено, что МИО на низкочастотной установке МИУ-3 нагревает поверхности образцов до 48...55 °С и повышает или не меняет среднее значение микротвердости  $HV$  при различных технологических режимах.

Магнитно-импульсная упрочняющая обработка на высокочастотной установке МИП-18 при высоких токах в индукторной системе при различных технологических режимах сильнее нагревает поверхности образцов титанового сплава (до 60...69 °С) и вызывает снижение среднего значения микротвердости  $HV$  на 27 %.

Низкая магнитная проницаемость титана (при 20 °С  $3,2 \cdot 10^{-6}$  см<sup>3</sup> / г) повышается с ростом температуры от –200 до 800 °С по линейному закону. Температурный коэффициент в этом интервале температуры поверхности равен  $0,0012 \cdot 10^{-6}$  см<sup>3</sup> / г. Резкое возрастание восприимчивости наблюдается в области ( $\alpha \rightarrow \beta$ )-превращения [6].

При повышенных температурах, а также при повышении легированности титана повышается теплопроводность сплавов на основе титана. Механические свойства титановых сплавов зависят от вида и содержания легирующих элементов, а также от фазового состава и структуры металла. Последнее определяется режимами горячей деформации и термической обработки металла.

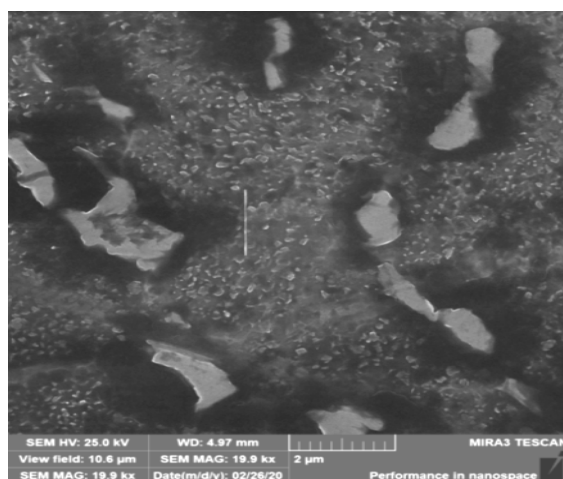
Проведенный рентгеноструктурный анализ образцов до и после МИО показал, что фазовый состав исследуемых образцов сплава ТС4 ( $\alpha + \beta$  Ti) не изменился. На рисунке 3 представлены исследования образца Т7 после МИО.

В таблице 1 представлены результаты измерений суммарных остаточных напряжений: на шести образцах (Т4, Т6, Т7, Т11, Т12, Т18) зафиксировано некоторое снижение (до –196 МПа) суммарных макронапряжений на поверхности, на семи образцах — повышение, на пяти — без изменений. Большая разница суммарных остаточных напряжений объясняется, по видимому, не какой-то закономерностью, а погрешностями в проведении измерений. Тем не менее следует отметить некоторую тенденцию к появлению сжимающих напряжений.

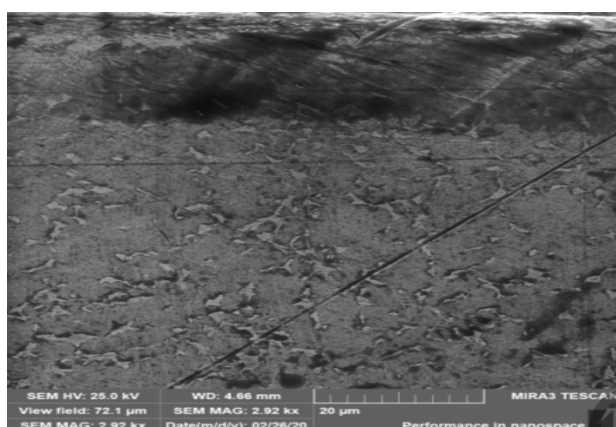
*Исследование влияния различных режимов МИО на микроструктуру образцов из титанового сплава.* Металлографический анализ микроструктур проведен на образцах титанового сплава ТС4 до и после МИО при различных режимах двух магнитно-импульсных установок — МИП-18 и МИУ-3 — в цилиндрическом индукторе.

Рассмотрим некоторые наиболее интересные микроструктуры с точки зрения исследованных изменений механических свойств (микротвердости, остаточных напряжений). Исследования механических свойств показали, что средняя микротвердость поверхности образца Т3 увеличилась в пределах погрешности измерений, а образца Т9 — повысилась на 4,4 %.

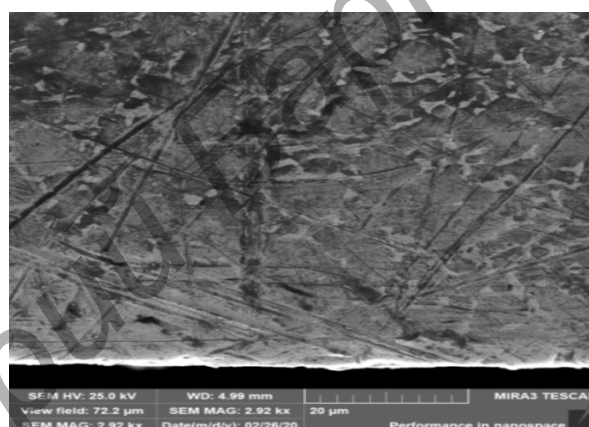
На рисунке 3 представлены микроструктуры образцов Т3 и Т9, полученные на растровом электронном микроскопе MIRA-3. Поверхности этих образцов после МИО на МИУ-3 разогрелись до одинаковой температуры 53...54 °С, однако свойства изменились по-разному.



а)



б)



в)

**Рисунок 3. — Микроструктура образцов сплава TC4 после МИО (РЭМ):  
а — середина образца T3; б — край образца T3; в — край образца T9**

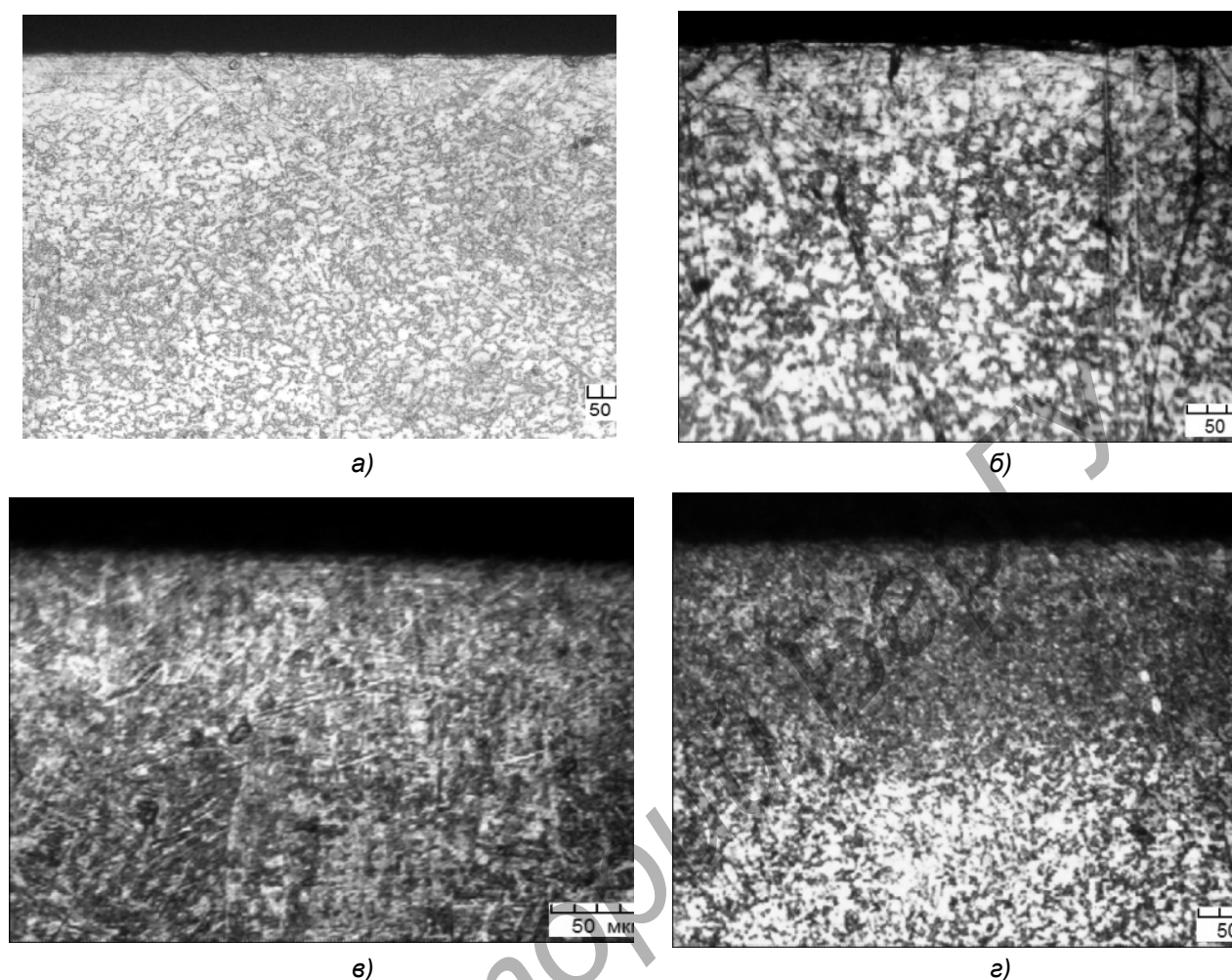
На рисунке 3, а, при большом увеличении хорошо видна двухфазная ( $\alpha + \beta$ ) структура сплава TC4. На рисунке 3, б, представлен образец T3, модифицированный МИО, в нижней части расположен край образца, на поверхности которого видна светлая полоса, видимо, слой альфирированного титана.

В верхней части рисунка 3, в, показан край образца T9. На поверхности хорошо видно изменение структуры под воздействием МИО на глубину до 120 мкм.

На рисунке 4 представлены микроструктуры образцов T3 и T9 до и после МИО, полученные при меньшем увеличении ( $\times 400$ ) на металлографическом комплексе МГК-1 на основе оптического микроскопа МКИ-2М.

На рисунке 4, б, представлена микроструктура образца T3 после МИО, на которой модификация поверхности заметна слабо на глубину 30 мкм; на рисунке 4, г, на верхнем краю образца T9 после МИО виден модифицированный МИО поверхностный слой глубиной до 120 мкм.

Поскольку сплав TC4 относится к сплавам, состоящим из  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз,  $\alpha$ -фаза имеет исходную равновесную структуру, ( $\alpha + \beta$ )-фаза имеет пластинчатый вид (см. рисунок 4, в). Пластинчатое строение сопровождается увеличением вязкости разрушения.  $\beta$ -фаза считается более пластичной, поэтому  $\beta$ -сплавы более технологичны и лучше обрабатываются давлением, чем  $\alpha$ -сплавы.



**Рисунок 4. — Микроструктуры образцов сплава TC4 до и после МИО, обработанные на МИУ-3: а — образец T3 до МИО; б — образец T3 после МИО при 12 кДж шести импульсов; в — образец T9 до МИО; г — образец T9 после МИО при 10 кДж пяти импульсов**

Одним из механизмов воздействия МИО на сплавы является деформационный. Видимо, модифицированный слой на поверхности образцов порядка 100 мкм образуется под воздействием высокого давления, которое возникает при МИО (см. рисунок 4, г).

На рисунке 5 представлены микроструктуры образцов T2 и T7 с повышением значений микротвердости после МИО на 4,7 и 4,75 % соответственно, на которых видно появление небольшого модифицированного слоя светлого цвета глубиной 30...40 мкм. Однако у образца T2 суммарное остаточное напряжение не изменилось, а у образца T7 снизилось на 130 МПа. На краю образца T7 основной  $\beta$ -фазы больше, в некоторых местах наблюдается столбчатая микроструктура (см. рисунок 5, б). На поверхности образца T2 после проведения МИО в количестве трех импульсов с энергией 12 кДж образуется уплотненный слой глубиной до 65 мкм (см. рисунок 5, г).

После проведения МИО образца T5 на установке МИП-18 (3 импульса с энергией воздействия 6 кДж) зафиксировано повышение температуры поверхности образца до 48 °С. При этом относительное среднее значение микротвердости по пяти точкам на поверхности снизилось на 23,8 %, суммарное остаточное напряжение увеличилось на 50 МПа, а на микроструктуре на рисунке 6, б, поперечного шлифа четко виден модифицированный уплотненный слой глубиной 60 мкм.

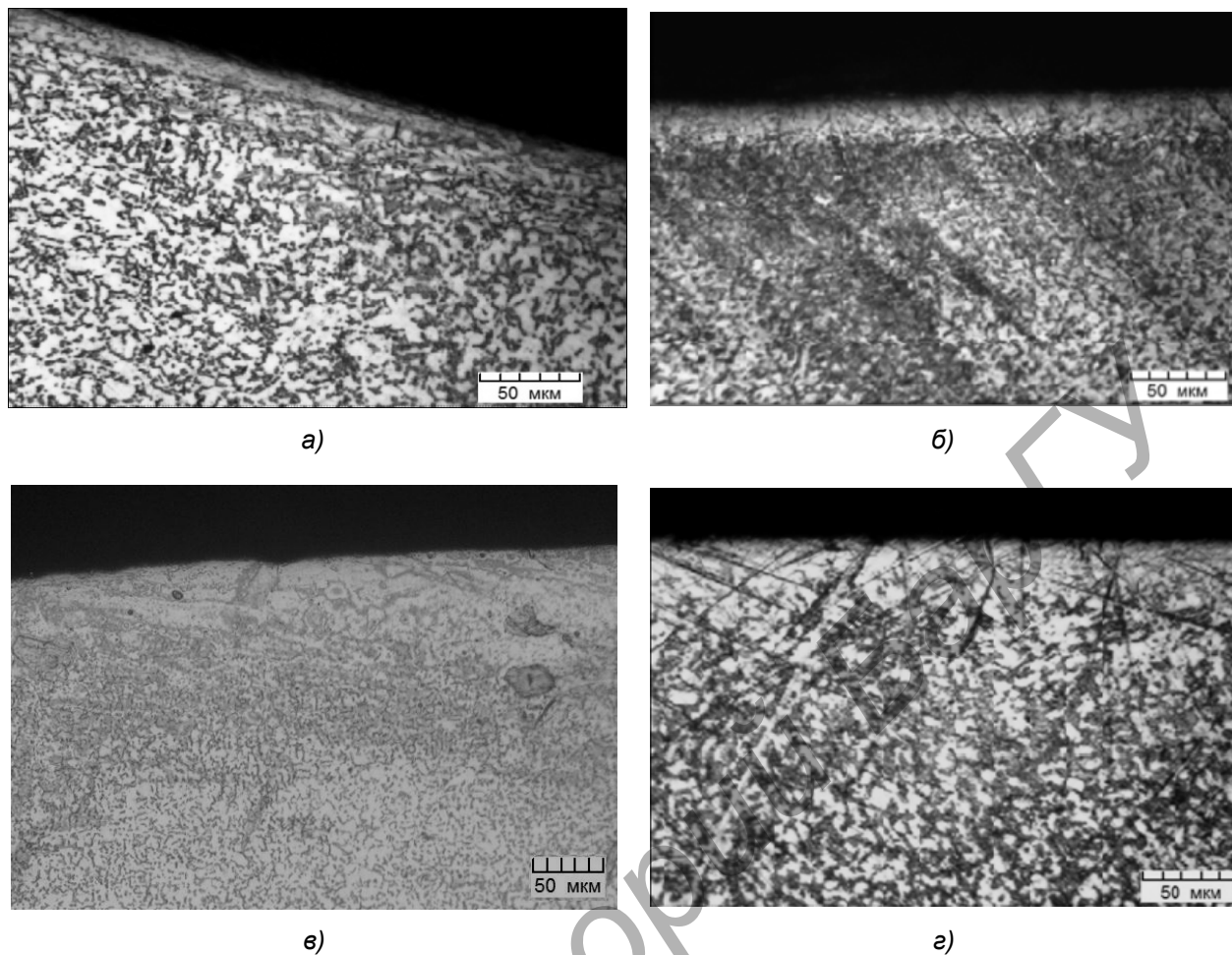


Рисунок 5. — Микроструктура образцов после проведения МИО на МИУ-3: а — образец Т7 до МИО; б — образец Т7 после проведения МИО при 9 кДж четырех импульсов; в — образец Т2 до МИО; г — образец Т2 после проведения МИО при 12 кДж трех импульсов

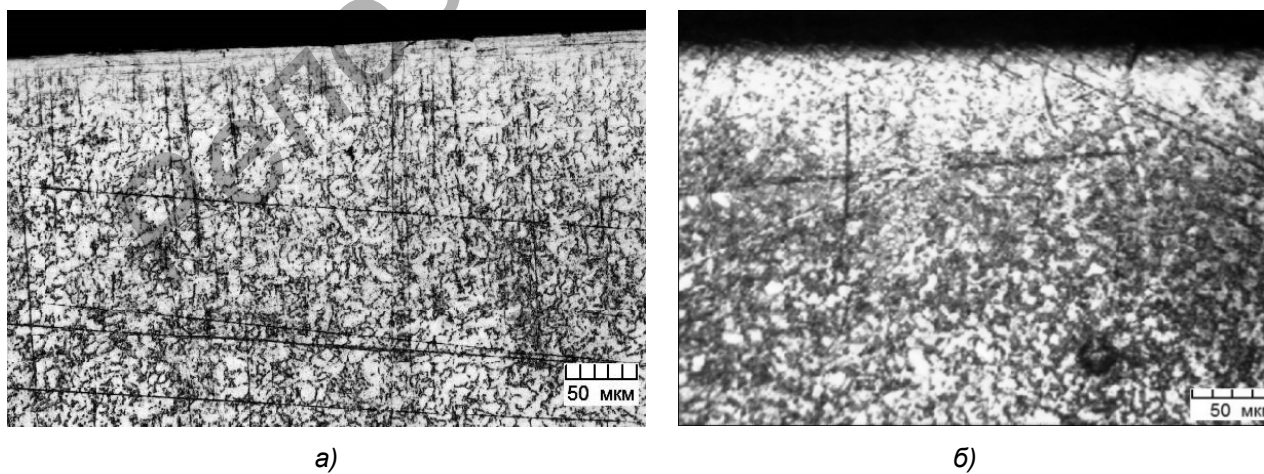


Рисунок 6. — Микроструктура образца Т5 после проведения МИО на МИП-18: а — до МИО; б — после проведения МИО при 6 кДж трех импульсов

Таким образом, металлографический анализ микроструктур показал, что определены технологические режимы МИО, под воздействием которых на некоторых образцах титанового сплава ТС4 в поверхностном слое образовался уплотненный модифицированный слой глубиной 30...120 мкм.

**Заключение.** Результаты проведенных исследований показали, что опыт работы с различными сталями (ферромагнетиками) не всегда можно с успехом использовать при упрочняющей обработке титановых сплавов (парамагнетиков), которые имеют особенности при структурно-фазовых превращениях. Тем не менее, проведя ряд опытных исследований, можно путем МИО произвести модификацию поверхностного слоя титановых образцов в нужном направлении: повысить или уменьшить микротвердость, добиться получения сжимающих напряжений, получить мелкозернистую структуру, что в совокупности позволит повысить эксплуатационные характеристики изделий из титановых сплавов.

Данная работа была выполнена при поддержке международного белорусско-китайского проекта ГКНТ в рамках договора с БРФФИ № T20КИТГ-003.

#### Список цитируемых источников

1. Алифанов, А. В. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милукова // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Клубовича. — Витебск : ВГТУ, 2017. — С. 31—52.
2. Малыгин, Б. В. Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. — М. : Машиностроение, 1998. — 130 с.
3. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов [и др.] // Весн. Нац. акад. навук. Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. — 2016. — № 4. — С. 31—36.
4. Импульсные методы обработки материалов / АН БССР, Физ.-техн. ин-т. — Минск : Наука и техника, 1977. — 216 с.
5. Модификация поверхности деталей из титановых и алюминиевых сплавов магнитно-импульсной обработкой / А. В. Алифанов [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / редкол.: С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2016. — Кн. 1 : Материаловедение. — С. 4—9.
6. Изменение микротвердости титана VT1-0 при воздействии магнитным полем 0,5 Тл / В. В. Шляров [и др.] // Вестн. Тамб. ун-та. Сер. «Естественные и технические науки». — 2016. — Т. 21, вып. 3 : Физика. — С. 1444—1446.
7. Горынин, И. В. Титан в машиностроении / И. В. Горынин, Б. Б. Чечулин. — М. : Машиностроение, 1990. — 400 с.

Поступила в редакцию 26.04.2021.

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.

**Материалы и методы исследования. Математическая модель.** Рассмотрим схемы обработки и геометрические параметры лезвий концевой и торцевой фрез (рисунок 1). Отличительными особенностями представленных схем обработки являются следующие. Во-первых, на них изображено встречное фрезерование, когда векторы линейной скорости главного движения  $D_r$  и движения подачи  $D_s$  в зоне резания имеют разные направления, движение потока  $D_{II}$  СОТС с линейной скоростью  $W$  направлено против главного движения резания  $D_r$  (условный вид А).

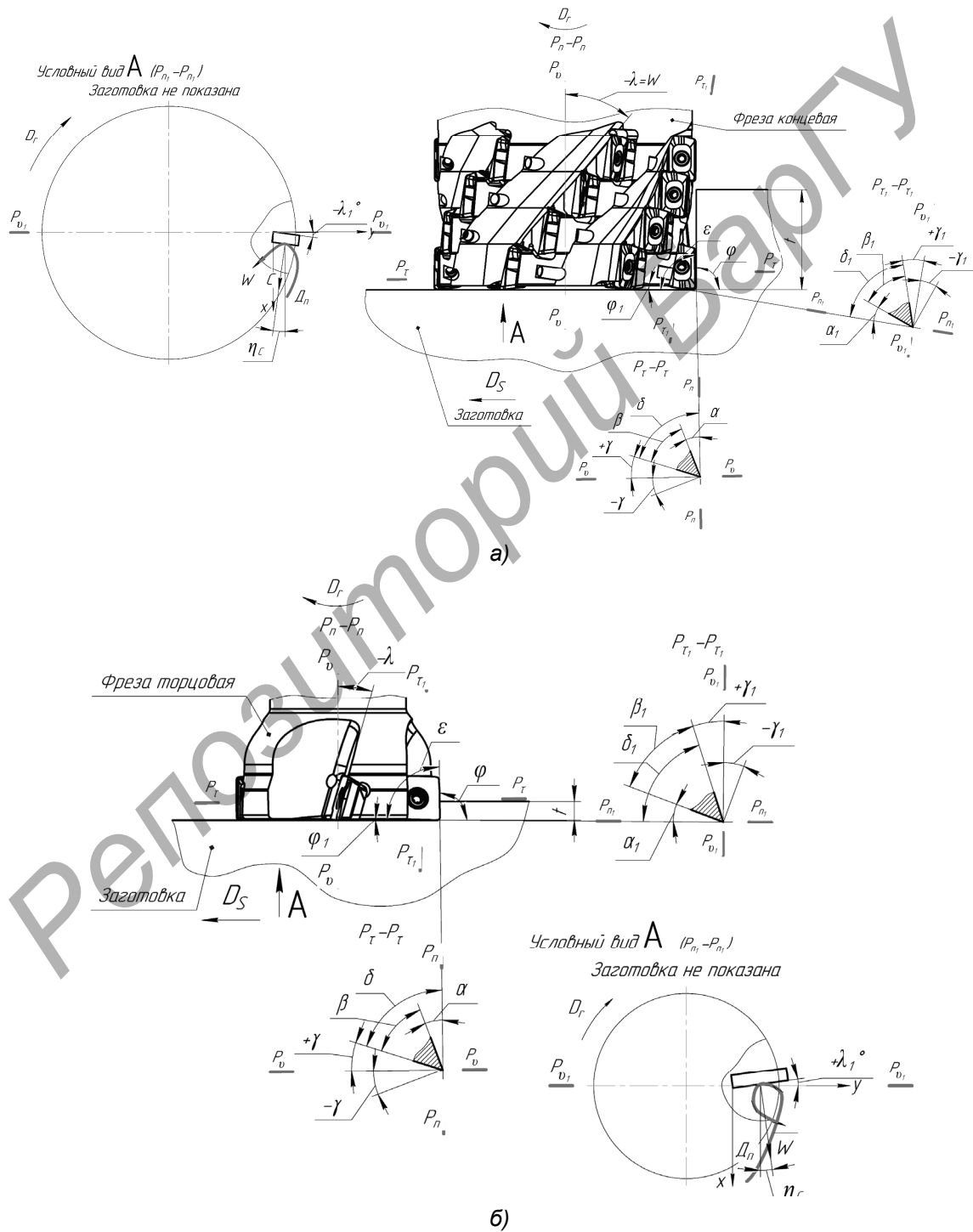


Рисунок 1. — Схемы обработки и геометрические параметры лезвий концевой (а) и торцевой (б) фрез

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

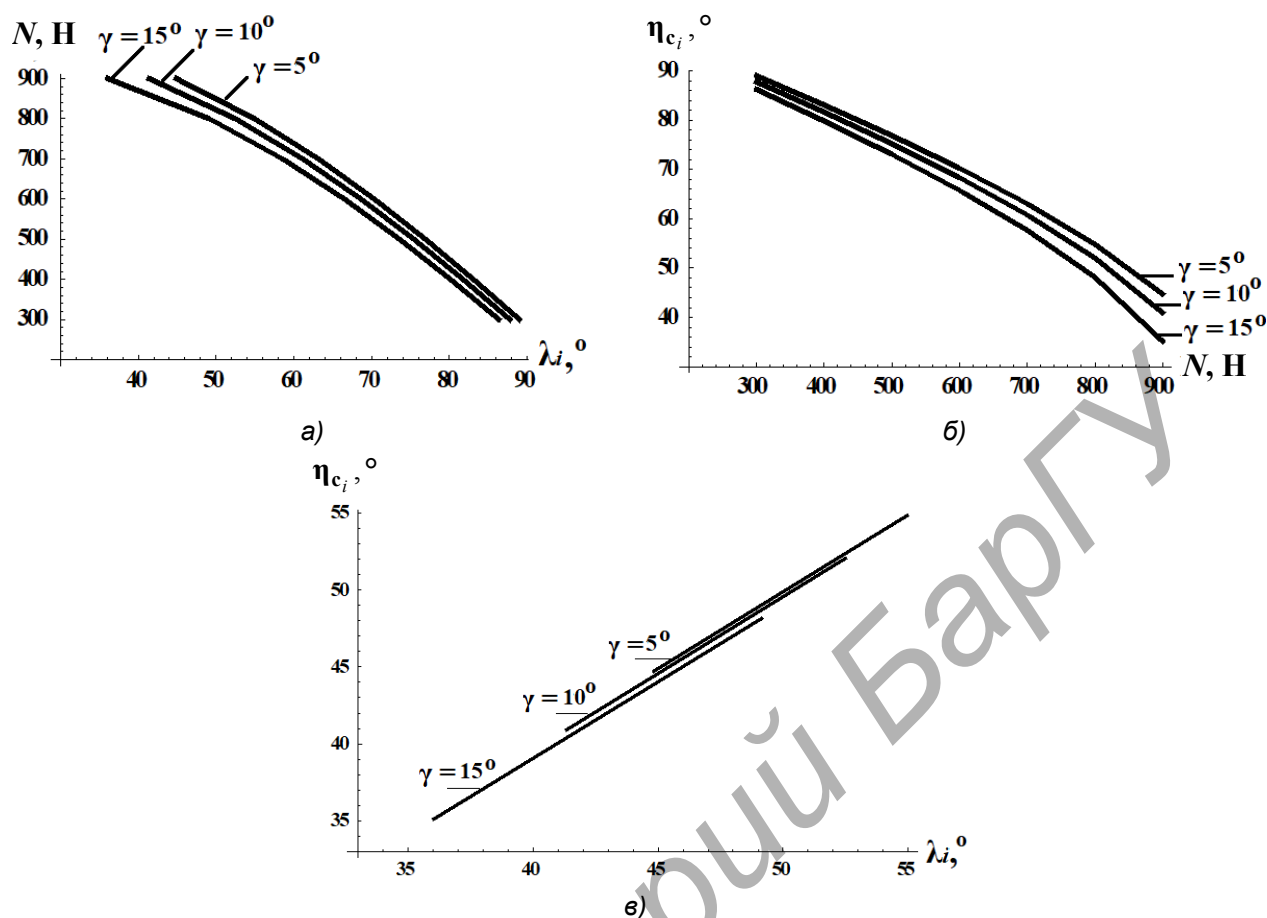


Рисунок 2. — Зависимости нормальной силы  $N$  от угла наклона режущей кромки  $\lambda_i$  (а), угла схода стружки  $\eta_{сi}$  от нормальной силы  $N$  (б) и угла наклона режущей кромки  $\lambda_i$  (в) при различных значениях переднего угла  $\gamma_i$

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

N, Н	$\gamma_i = 15^\circ$		$\gamma_i = 20^\circ$		$\gamma_i = 25^\circ$		$\gamma_i = 30^\circ$	
	$\lambda_i$	$\eta_{сi}$	$\lambda_i$	$\eta_{сi}$	$\lambda_i$	$\eta_{сi}$	$\lambda_i$	$\eta_{сi}$
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	
	$\lambda_i$	$\eta_{сi}$	$\lambda_i$	$\eta_{сi}$	$\lambda_i$	$\eta_{сi}$	$\lambda_i$	$\eta_{сi}$
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

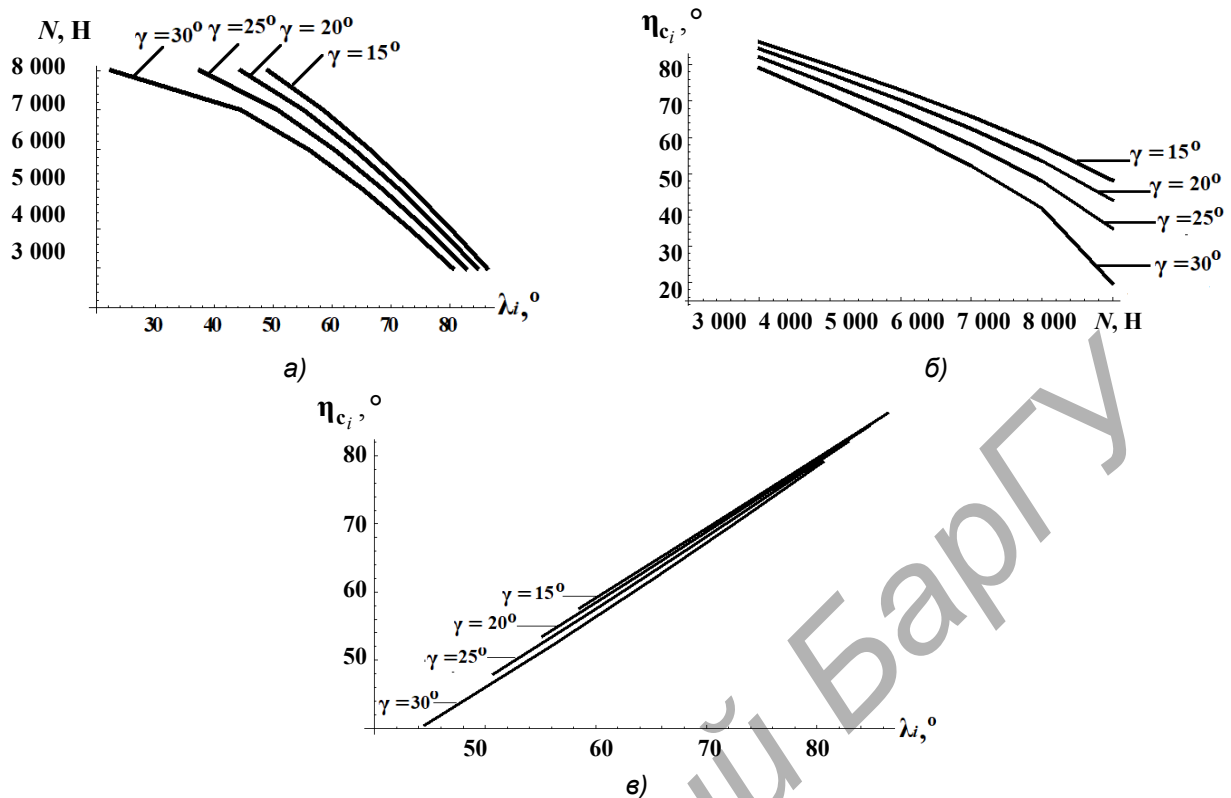


Рисунок 3. — Зависимости нормальной силы  $N$  от угла наклона режущей кромки  $\lambda_i$  (а), угла схода стружки  $\eta_{сi}$  от нормальной силы  $N$  (б) и угла наклона режущей кромки  $\lambda_i$  (в) при различных значениях переднего угла  $\gamma_i$

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  $\nu$ .

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

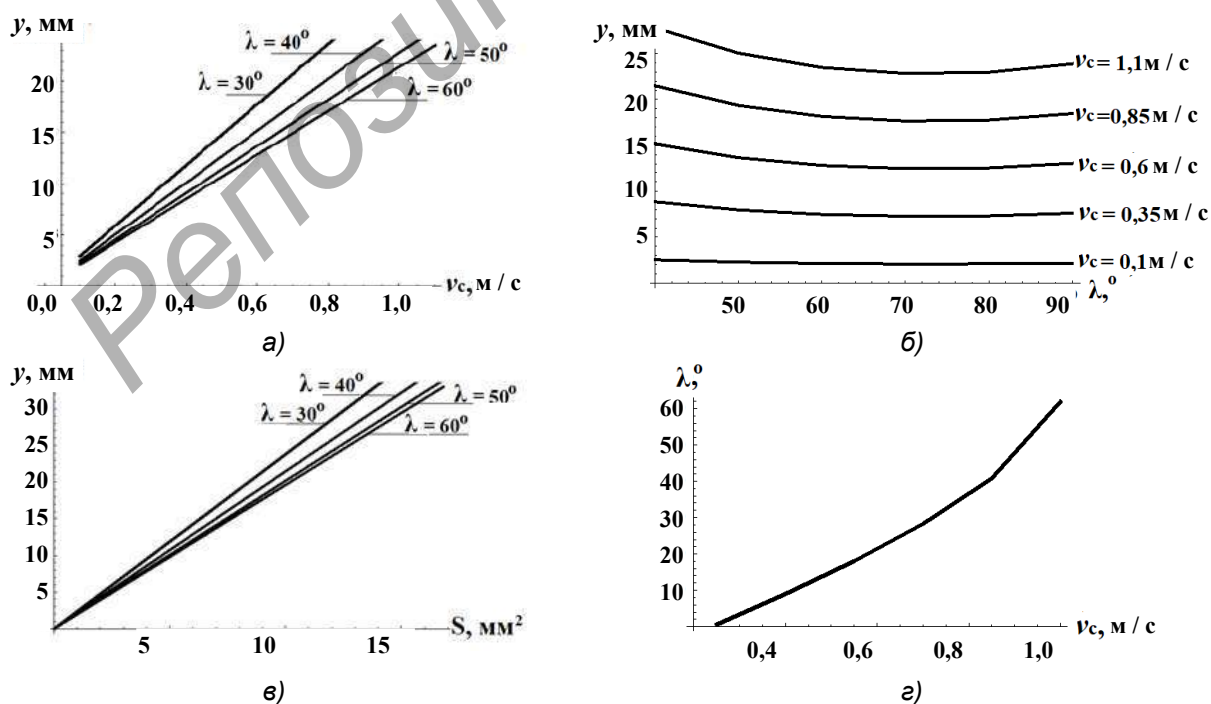


Рисунок 4. — Зависимости изменения координаты  $y$  от скорости стружки  $v_c$ , (а), площади  $S$  (б), угла  $\lambda_i$  (в) и угла  $\lambda_i$  от скорости стружки  $v_c$ , (г)

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.

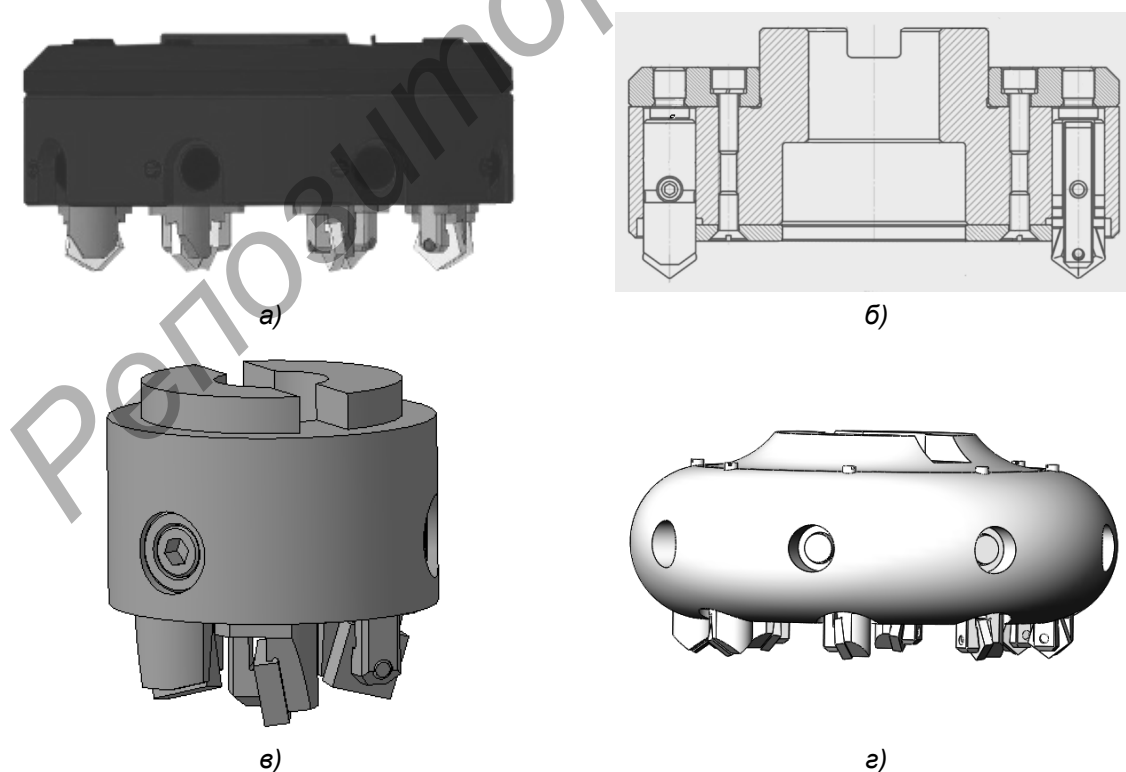
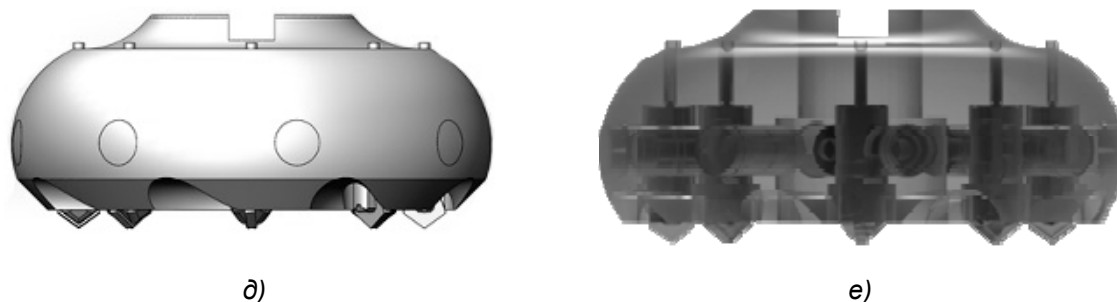


Рисунок 5. — Экспериментальные образцы: без стружкоотводящих канавок в форме диска (а и б), цилиндра (в), тора (г), со стружкоотводящими канавками (д и е)



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, *a—z*, предусмотрен свободный сход стружки и подвод СОТС, определяемые только углом наклона режущей кромки лезвия, в конструкциях на рисунке 5, *д—e*, 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.

УДК 621.926

**В. А. Потапов<sup>1</sup>, Л. А. Сиваченко<sup>2</sup>, В. А. Дремук<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 225 76 26, vladimir-potapov-1990@mail.ru

<sup>2</sup>Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Министерство образования Республики Беларусь, пр-т Мира, 43, 212000 Могилев, Республика Беларусь, +375 (44) 792 86 83, 228011@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЦЕПНОГО АГРЕГАТА НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МЕЛА В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗВЕСТИ

Проведен анализ возможности применения цепного агрегата при производстве извести «сухим» способом, в частности, рассмотрен вариант его применения при первичной переработке мела. Изготовлена экспериментальная установка цепного агрегата с волновой рабочей камерой и требуемым размером просеивающих отверстий цепного полотна. Проведены экспериментальные исследования и получены зависимости степени измельчения и потребляемой мощности при различных значениях амплитуды и частоты колебаний толкающей штанги, а также определена величина выхода фракции 5...25 мм.

**Ключевые слова:** известь; цепной агрегат; волновая камера; степень измельчения; мел; переработка.

Рис. 5. Табл. 2. Библиогр.: 12 назв.

**V. A. Potapov<sup>1</sup>, L. A. Sivachenko<sup>2</sup>, V. A. Dremuk<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voikova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 225 76 26, vladimir-potapov-1990@mail.ru

<sup>2</sup>Belarusian-Russian University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 43 Mira Ave., 212000 Moguilev, the Republic of Belarus, +375 (44) 792 86 83, 228011@mail.ru

## 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

The analysis of the possibility of using a chain unit in the production of lime by the “dry” method is carried out, in particular, the option of its use in the primary processing of chalk is considered. An experimental installation of a chain unit with a wave working chamber, with the required size of the screening holes of the chain blade, has been made. Experimental studies were carried out and the dependences of the degree of grinding and power consumption were obtained at various values of the amplitude and frequency of oscillations of the pushing rod, and also the value of the yield of the fraction 5...25 mm.

**Key words:** lime; chain unit; wave camera; grinding degree; chalk; processing.

Fig. 5. Table 2. Ref.: 12 titles.

**Введение.** Производство извести в Республики Беларусь осуществляется на ряде крупных предприятий и обусловлено её широким применением в строительной отрасли (при производстве строительных растворов и силикатных изделий), в химической промышленности (производство кальцинированной соды, хлорной извести, синтетического каучука), пищевой (при очистке сока сахарной свеклы) и в ряде других отраслей.

Сырьевым материалом для её производства является мел, который соответствующим образом подготавливают и обжигают во вращающихся печах. Согласно статистическим дан-

ным, производство извести за последние 3 года приблизительно находится на одном уровне, например, в 2019 году составляло 463,9 тыс. т [1]. Мел обжигают во вращающихся печах «сухим» и «мокрым» способами. Одним из основных недостатков «мокрого» способа является высокая энергоёмкость процесса, достигающая 310...320 кг условного топлива на тонну производимой извести [2; 3]. Наиболее перспективным является способ производства извести «сухим» способом, который позволяет сократить расход условного топлива до 240 кг на тонну производимой извести и, таким образом, делает его наиболее перспективным с точки зрения энергоэффективности.

**Материалы и методы исследования.** Мел относится к карбонатным породам и является разновидностью известняка. Карбонатные породы при увлажнении заметно снижают свою прочность. Предел прочности мела при сжатии изменяется в пределах 1,0...4,5 МПа для чистых разновидностей мела [4; 5]. При увлажнении прочность мела начинает снижаться уже при влажности 1...2 %, а при влажности 25...30 % прочность на сжатие снижается в 2...3 раза, при этом появляются пластические свойства [5]. Среднегодовая карьерная влажность добываемого мела находится на уровне 25...26 %, а в отдельные периоды достигает 33...35 %. Таким образом, первичная переработка мела сопряжена со следующими особенностями: анизотропность, высокая адгезия, также характерна размерная неопределенность и наличие посторонних включений.

Рассмотрев физико-механические свойства мела, необходимо подобрать предпочтительный способ силового воздействия на материал. Мел изменяет свои свойства от хрупкого до вязкого состояния и относится к материалу малой прочности, предпочтительным способом воздействия на такой материал является удар, истирание и раскалывания. Сочетание данных способов силового воздействия приведет к снижению энергозатрат процесса измельчения [6].

После первичной переработки мел поступает на обжиг во вращающуюся печь. При обжиге скорость процесса диссоциации  $\text{CaCO}_3$  зависит не только от температуры, но и от размеров кусков мела [3]. На основании исследований, представленных в работах [3; 7], установлено, что мел, поступающий на обжиг в длинные вращающиеся печи, должен иметь размер фракции 5...25 мм, что позволит получить известь с относительно высокой активностью от 75 до 88 %. Размер фракции мела в диапазоне 0...5 мм и более 25 мм снижает активность извести.

Эксплуатация используемого в технологиях первичной переработки влажного карьерного мела оборудования, в частности, валковых дробилок, зубчатых, молотковых или фрезерных измельчителей, характеризуется большими производственными издержками и низким качеством получаемого продукта. Это обусловлено в первую очередь изменчивостью физико-механических свойств мела, особенно реологических, и наличием каменистых включений, что вызывает необходимость создания принципиально новых видов оборудования, способных производить комплексную переработку такого материала адаптивными методами с максимальной эффективностью и минимальным набором технологических агрегатов.

Технической гипотезой данной работы следует считать выполнение рабочего оборудования из двух совмещенных адаптивных механизмов, каждый из которых решает свои задачи. Первый — толкающая штанга — обеспечивает интенсивное разрушение исходного материала, второй — цепное полотно — осуществляет подачу материала в зоны разрушения и одновременное просеивание измельченного до требуемой фракции продукта.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Проведен анализ исходного фракционного состава мела, поступившего из карьера на линию производства извести «сухим» способом в ОАО «Красносельскстройматериалы», без учета посторонних включений.

Установлено, что размер фракции мела в диапазоне от 0 до 5 мм в среднем составляет 20 %, размер фракции от 5 до 25 мм составляет в среднем 30 %, материал с размером фракции от 25 мм и более в среднем составляет 50 % от общей массы.

На основании проведенного анализа исходного фракционного состава можно сделать вывод, что необходим такой агрегат для первичной переработки, который бы практически не воздействовал на материал с исходной фракцией от 0 до 25 мм и эффективно измельчал материал крупностью более 25 мм.

Ввиду особенностей свойств сырья и процесса измельчения мела, а также анализа работы рабочего оборудования, представленных в работах [8—12], спроектирован и изготовлен экспериментальный образец цепного агрегата с волновой рабочей камерой, схема которого представлена на рисунке 1, на рисунке 2 представлен общий вид цепного агрегата.

Работа цепного агрегата происходит следующим образом (см. рисунок 1). Шатун 7, совершая плоскопараллельное движение, приводит в действие маятниковые рычаги 3 (второй на рисунке 1 не показан), на котором жестко закреплена толкающая штанга 4, при этом движение сообщается цепным полотнам 6 и гибким стенкам 5. Таким образом, всё рабочее оборудование совершает вынужденные колебания с определенной частотой и амплитудой, величины которых можно изменять в определенном диапазоне.

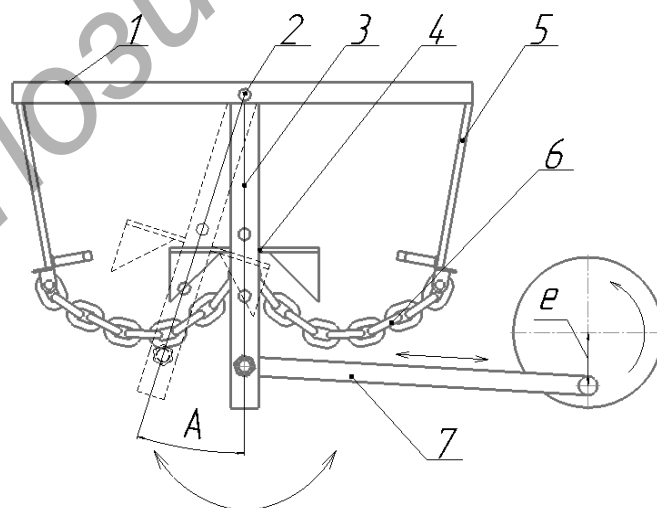
Техническая характеристика цепного агрегата с волновой рабочей камерой представлена в таблице 1.

Эксперименты проводились на материале влажностью 21...26 %. Варьируемые параметры — амплитуда и частота колебаний толкающей штанги.

В целях оценки процесса измельчения мела амплитуда толкающей штанги была принята в двух крайних диапазонах — 15,0 и 37,5 мм. Частота колебаний толкающей штанги — в диапазоне от 5 до 10 Гц, с шагом варьирования — 1,66 Гц.

Оценка влияния режимов работы на процесс оценивалась по двум показателям: степень измельчения и потребляемая мощность.

Исходный фракционный состав мела при проведении экспериментов представлен в таблице 2. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 3.



1 — рама; 2 — ось подвеса; 3 — маятниковый рычаг; 4 — толкающая штанга; 5 — гибкая стенка; 6 — цепное полотно; 7 — шатун; A — амплитуда; e — эксцентриситет

**Рисунок 1. — Схема рабочего оборудования цепного агрегата с волновой рабочей камерой**



Рисунок 2. — Общий вид экспериментального цепного агрегата с волновой рабочей камерой

Т а б л и ц а 1. — Техническая характеристика цепного агрегата с волновой рабочей камерой

Наименование параметра	Значение
Размеры приемного отверстия в плане, мм	450 × 350
Объем рабочей камеры, м <sup>3</sup>	0,046
Мощность приводного электродвигателя, кВт	1,1
Частота колебаний толкающей штанги, Гц	0...10
Амплитуда колебаний толкающей штанги, мм	15 / 22,5 / 30 / 37,5
Габаритные размеры, мм:	
длина	575
ширина	500
высота	640
Масса агрегата, кг	45

Т а б л и ц а 2. — Исходный фракционный состав мела

Материал	Весовое содержание фракций, %			
	0...5*	5...10*	10...25*	25...100*
Мел	20	10	20	50

Примечание. \* — размер частиц, мм.

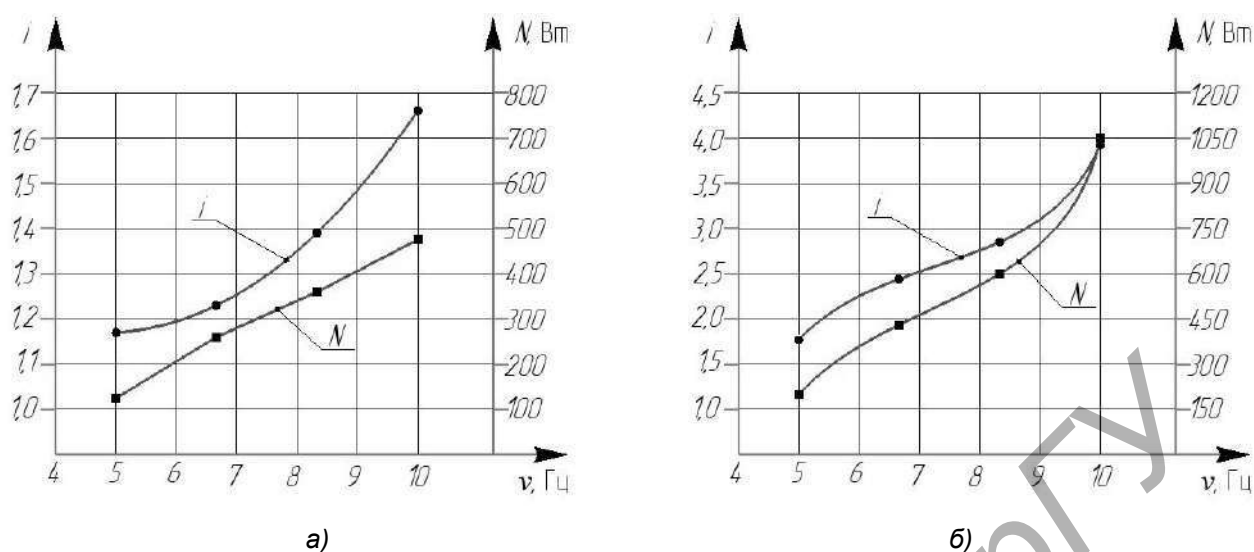
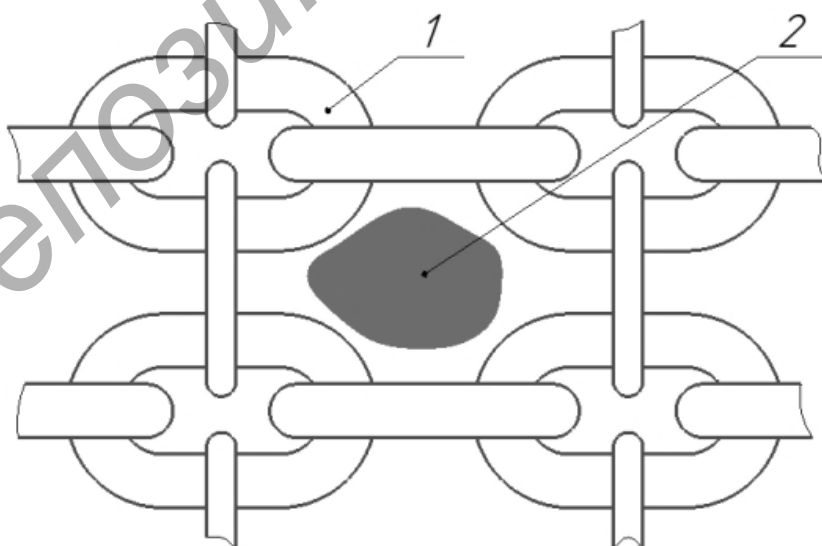


Рисунок 3. — Влияние частоты и амплитуды колебаний толкающей штанги на степень измельчения  $i$  и потребляемую мощность  $N$ : амплитуда толкающей штанги 15 мм (а); амплитуда толкающей штанги 37,5 мм (б)

При проведении экспериментов установлено, что основное влияние на процесс разрушения кусков мела оказывают амплитуда и частота колебаний толкающей штанги 4 (см. рисунок 1), о чем говорит качественный показатель процесса — степень измельчения. Цепное полотно б (см. рисунок 1) изготовлено таким образом, чтобы размер просеивающих отверстий позволял отсеивать фракцию в диапазоне от 0 до 25 мм. Схема прохождения материала через просеивающее отверстие цепного полотна представлена на рисунке 4, а общий вид цепного полотна — на рисунке 5.



1 — звено цепи; 2 — материал

Рисунок 4. — Схема прохождения материала через просеивающее отверстие цепного полотна



Рисунок 5. — Общий вид цепного полотна

Повышение степени измельчения и потребляемой мощности обусловлено возникающими силами инерции рабочих органов и интенсивностью взаимодействия рабочих органов с частицей измельчаемого материала.

Изменение величины амплитуды колебаний толкающей штанги с точки зрения энергоэффективности процесса является более предпочтительным (см. рисунок 3): с увеличением амплитуды колебаний толкающей штанги с 15 до 37,5 мм потребляемая мощность возрастает на 60...120 %.

При исходном фракционном составе (см. таблицу 2) и средневзвешенном размере фракции 38 мм теоретическое значение степени измельчения должно находиться в пределах от 1,5 до 7,5, что позволит получить преобладающий размер кускового материала в диапазоне от 5 до 25 мм. Проведенные исследования позволили установить, что действительное значение степени измельчения должно находиться в диапазоне от 2,5 до 3. При такой степени измельчения достигнут выход фракции в диапазоне 5...25 мм 55...60 % от общей массы переработанного материала. Увеличение и уменьшение величины степени измельчения приведут к повышению количества переизмельченной фракции 0...5 мм.

**Заключение.** Научный результат проведенных исследований заключается в установлении зависимостей влияния амплитуды и частоты колебаний толкающей штанги на степень измельчения и потребляемую мощность. Установлено, что оптимальная величина степени измельчения для мела при исходном фракционном составе составляет 2,5...3. Выход фракции 5...25 мм при данной степени измельчения находится в пределах от 55 до 60 % от общей массы переработанного материала, что является максимальным значением.

Практическая значимость выполненных исследований заключается в создании конструкции универсального агрегата, способного эффективно измельчать и классифицировать перерабатываемый материал, а при соответствующей доработке осуществлять камнеудаление и первичную сушку.

#### Список цитируемых источников

1. Промышленность Республики Беларусь [Электронный ресурс] // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. — Минск, 2020. — Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/aeb/aeb02f77163a24af4b9cfe2dd576b29d.pdf>. — Дата доступа: 30.03.2021.

2. Кузьменков, М. И. Химическая технология вяжущих веществ / М. И. Кузьменков, О. Е. Хотянович. — Минск : БГТУ, 2008. — 263 с.

3. Совершенствование технологии производства строительной извести из переувлажненного сырья / В. Л. Максименко [и др.] // Новейшие достижения в области инновационного развития в химической промышленности и производстве строительных материалов : материалы Междунар. науч.-техн. конф., 18—20 нояб. 2015 г. — Минск : БГТУ, 2015. — С. 66—69.

4. Назарова, В. В. Интенсификация процесса производства тонкодисперсного мела для композиционных материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.11 / В. В. Назарова. — М., 2012. — 127 л.

5. Ермолович, Е. А. Исследование влияние вещественного состава на физико-механические характеристики мела / Е. А. Ермолович, А. В. Овчинников // Изв. Тул. гос. ун-та. Науки о Земле. — 2019. — № 1. — С. 275—285.

6. Сиденко, П. Л. Измельчение в химической промышленности / П. Л. Сиденко. — М. : Химия, 1968. — 382 с.

7. Монастырев, А. В. Пути снижения расхода топлива при обжиге мела с получением извести в длинных вращающихся печах / А. В. Монастырев // Строит. материалы. — 2010. — № 9. — С. 9—15.

8. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия : коллектив. монография / 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.

9. Потапов, В. А. Цепной агрегат с волновой рабочей камерой и адаптивным механизмом силового воздействия для переработки влажных сырьевых материалов / В. А. Потапов, Л. А. Сиваченко // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2020. — Вып. 8. — С. 98—105.

10. Потапов, В. А. Рабочее оборудование цепного агрегата для переработки сложных и неоднородных материалов / В. А. Потапов, Л. А. Сиваченко, М. С. Кузьменкова // Энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительных отраслях : материалы Междунар. науч.-практ. конф. — Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2019. — С. 174—181.

11. Сиваченко, Л. А. Использование цепного агрегата в технологии производства извести / Л. А. Сиваченко, В. А. Потапов // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : материалы Междунар. науч.-практ. конф. — Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2020. — С. 366—369.

12. Потапов, В. А. Энергосберегающая технология производства извести / В. А. Потапов, А. Н. Хустенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающее технологии : материалы Междунар. науч.-практ. конф. — Могилев : БРУ, 2021. — С. 193—194.

Поступила в редакцию 03.05.2021.

УДК 621.9.048.7+621.9.047/048

**И. А. Романчук, В. С. Голубев, И. И. Вегера**

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт  
Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика В. Ф. Купревича, 10, 220141 Минск,  
Республика Беларусь, +375 (17) 369 31 24, gvs\_fti@mail.ru

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ И ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКЕ

В данной работе проведены исследования микроструктуры, качества и ряда физико-механических характеристик сформированных слоев, создаваемых на рабочих поверхностях образцов из конструкционных сталей методами плазменно-порошковой и лазерной наплавки, в том числе при их комбинации. Лазерная наплавка выполнялась с использованием газового CO<sub>2</sub>-лазера «Комета-2». Основной целью использования в экспериментах плазменно-порошкового метода являлось исследование процесса плазменной наплавки порошковых материалов на стальные, в том числе клиновидные или тонкостенные, изделия с использованием постоянной и постоянно-импульсной плазмы. С использованием лазерной наплавки на основе никелевых самофлюсующихся порошков по предварительно сформированному плазменному подслою показана возможность получения двухслойной композиции необходимой твердости с качественной зоной сплавления. Наличие промежуточного плазменного подслоя ~0,3 мм при лазерной наплавке не приводит к существенному изменению поверхностной твердости всей композиции «покрытие — основной металл» по сравнению с твердостью только одного лазерного слоя той же толщины.

**Ключевые слова:** лазерная наплавка; плазменно-порошковая наплавка; поверхностный слой; микроструктура.

Рис. 3. Библиогр.: 10 назв.

**I. A. Romanchuk, V. S. Golubev, I. I. Vegera**

State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”,  
10 Akademika V. F. Kuprevich Str., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 369 31 24, gvs\_fti@mail.ru

## FEATURES OF FORMING OF CONSOLIDATING COVERAGES AT COMPLEX LASER AND PLASMA-POWDER SURFACING

In this work studies of the microstructure, quality and a number of physical and mechanical characteristics of the formed layers, created on the working surfaces of samples from structural steels by plasma-powder and laser surfacing, including their combination, have been carried out. Laser surfacing was carried out using a gas CO<sub>2</sub>-laser “Kometa-2”. The main purpose of using the plasma-powder method in experiments was to study the process of plasma surfacing of powder materials on steel, including wedge-shaped or thin-walled, products using constant and constant-pulse plasma. Using laser cladding based on self-fluxing nickel powders over a pre-formed plasma sublayer, the possibility of obtaining a two-layer composition of the required hardness with a high-quality fusion zone is shown. The presence of an intermediate plasma sublayer of ~0.3 mm during laser cladding does not lead to a significant change in the surface hardness of the entire “coating — base metal” composition in comparison with the hardness of only one laser layer of the same thickness.

**Key words:** laser cladding; plasma-powder cladding; surface layer, microstructure.

Fig. 3. Ref.: 10 titles.

**Введение.** Технология наплавки является весьма эффективным способом как поверхностного упрочнения новых деталей, так и восстановления изношенных всевозможного функционального назначения. Эта технология позволяет в нужных местах на рабочих поверхностях формировать достаточно толстые покрытия с толщиной до ~10 мм. Для этого

метода характерна металлургическая связь покрытия с основой, при этом может обеспечиваться высокая производительность обработки до 10 кг и более наплавляемого материала в час. В зависимости от используемого метода наплавки в качестве присадки могут применяться порошковые электроды с покрытиями, компактные прутки или проволоки, ленты и просто порошки [1—3].

В номенклатуру порошковых материалов входят как металлические, так и композиционные порошки, различные порошковые смеси, в том числе с тугоплавкими соединениями. Это дает возможность на их основе создавать высококачественные слои с необходимыми эксплуатационными характеристиками наплавленных деталей для различных условий износа, эрозии, коррозии и т. п. Применение в качестве энергетических источников наплавки лазера или плазмы с высокой (до  $10^6$  Вт / см<sup>2</sup>) плотностью мощности потока дает возможность формировать наплавленные слои с небольшим коэффициентом перемешивания металла основы и материала покрытия, обеспечивать при этом незначительные остаточные деформации.

Возможны различные схемы осуществления плазменной или лазерной порошковой наплавки:

1) присадочный порошок равномерным слоем насыпается на обрабатываемую поверхность или закрепляется на ней с помощью специального связующего, наносится на поверхность, например, в виде газотермических или гальванических покрытий. Достоинством данного способа является высокий коэффициент использования дорогостоящего порошкового материала;

2) наплавляемый присадочный порошок вводится непосредственно в зону расплава с помощью различных сопловых устройств.

В настоящее время в Физико-техническом институте НАН Беларуси научно-технические вопросы лазерного поверхностного модифицирования и наплавки изучены в достаточной степени, что позволило на этой основе разработать ряд технологических процессов упрочнения и восстановления быстроизнашивающихся деталей автомобильной и авиационной техники, сельскохозяйственных машин, оборудования энергетического машиностроения и др. [4].

Комбинированные технологии, при которых энергия различных источников вводится в зону обработки последовательно во времени [5], позволяют эффективно нивелировать недостатки отдельной монотехнологии и обусловлены снижением потерь времени за счёт исключения и сокращения количества промежуточных и вспомогательных операций. В частности, комбинированные лазерно-плазменные методы существенно расширяют использование технологий упрочнения, номенклатуру деталей и материалов покрытий, позволяют минимизировать затраты на обработку при приемлемом качестве обрабатываемых слоёв.

Так, применение отдельной технологии (монотехнологии — лазерной или плазменной) для упрочнения ряда деталей, например, с неоднородным поперечным сечением, таких как ножи кормо- и зерноуборочных сельскохозяйственных машин и др., не всегда может обеспечить приемлемое качество наплавленных слоёв и необходимые эксплуатационные параметры по отношению к себестоимости самого процесса обработки. Для упрочнения подобных деталей технологически возможно и, по-видимому, экономически целесообразно применять комбинированный лазерно-плазменный метод: острые режущие кромки обработать лазерным излучением, а оставшуюся часть — с помощью плазменного воздействия. При этом в зоне стыковки технологий наблюдается комплексная наплавка, например, лазерная наплавка накладывается на предварительно наплавленную плазменно-порошковым методом поверхность. Возникающие при плазменной обработке нежелательные дефекты (деформации, трещины, поры и т. д.) обычно минимизируют за счёт соблюдения оптимального температурного режима на стадиях подготовки поверхности и нанесения покрытия (наплавки), формирования промежуточных слоёв специального состава и определённой толщины на границе «основной металл — покрытие», различных методов и приёмов наплавки [6]. Осаждение промежуточных слоёв в ряде случаев более целесообразно осуществлять лазерно-

порошковой наплавкой, что позволяет обеспечивать высокое их качество при необходимой толщине и минимальном проплавлении основного металла. Исследование и разработка комбинированных лазерно-плазменных процессов формирования упрочняющих покрытий предполагает учёт особенностей концентрированных потоков энергии для каждого из этих методов в отдельности [7; 8].

**Материалы и методы исследования.** В данной работе проведены исследования микроструктуры, качества и ряда физико-механических характеристик (геометрические размеры, твёрдость, микротвёрдость и др.) сформированных слоев (износостойкое покрытие, переходной слой, основной металл), создаваемых на рабочих поверхностях образцов из конструкционных сталей типа 65Г, 40Х методами плазменно-порошковой и лазерной наплавки, в том числе при их комбинации. Лазерная наплавка (порошки ПГ-10Н-01, ПГ-12Н-01, ПС-12НВК-01 и Т-Термо 650) выполнялась с использованием газового CO<sub>2</sub>-лазера «Комета-2» при мощности излучения ~0,6 кВт. Технологические режимы лазерной наплавки выбирались в зависимости от энергетической плотности потока лазерного излучения, линейных скоростей сканирования лазерного луча, диаметра пятна фокусировки и шага между лазерными дорожками.

В настоящее время в технологических комплексах для осуществления как лазерной, так и плазменной наплавки перспективно использование многоструйной коаксиальной подачи присадочного порошкового материала (ППМ) в зону обработки. В этой связи для проведения экспериментов нами было изготовлено соответствующее сопло [7]. Сопло состояло из 24 выфрезерованных каналов протяжённостью 40 мм с сечением  $0,7 \times 0,7 \text{ мм}^2$ , которые располагались симметрично относительно оси лазерного пучка под углом 50°. Подаваемый газом порошок вытекал из выходных отверстий этих транспортных каналов и сходил в виде конуса, достигая наплавляемой поверхности в окрестности фокусировки лазерного луча. Таким образом, вне зависимости от направления перемещения подложки относительно источника поверхностного нагрева это дает возможность формировать равномерные слои и минимизировать потери наплавочного порошка [9].

Основной целью использования в данной работе плазменно-порошкового метода являлось исследование процесса плазменной наплавки также высокопрочных самофлюсующихся порошковых материалов на стальные, в том числе клиновидные или тонкостенные, изделия с использованием постоянной и постоянно-импульсной плазмы. Для плазменной наплавки применялись те же порошки ПГ-10Н-01 и ПГ-12Н-01. Указанный режим работы плазматрона позволяет уменьшить опасность проплавления тонкостенной поверхности, повысить качество наплавляемого слоя, снизить термические поводки. Для решения поставленной задачи была проведена доработка конструкции непосредственно самого плазматрона с катодом из вольфрама диаметром 4 мм, легированного лантаном. Используемый для реализации процесса наплавки сварочный плазматрон повышенной надежности PLP 200 Aut стандартно укомплектован специальным соплом для подачи порошка с максимальной фракцией до 0,25 мм и с необходимым расходом 4...35 г / мин. Расход транспортирующего газа при этом мог составлять 2...4 л / мин. Источник питания дежурной и основной дуг дает возможность формировать на выходе постоянное и постоянно-импульсное напряжения. Для обеспечения подачи в зону плазменной струи наплавляемого порошка в постоянном и импульсном режимах была разработана и изготовлена специальная конструкция порошкового питателя. В конструкции были использованы эффект кипящего слоя и вибрирующий дозирующий электрод.

При необходимости перемещений наплавочной головки «челночного» типа была предусмотрена возможность с определённым шагом выполнять возвратно-поступательные движения перпендикулярно направлению наплавки. При этом могла задаваться амплитуда  $A$  колебаний головки. Для осуществления таких колебаний лазерной или плазменной головки в экспериментах использовался автоматизированный портал с числовым программным уп-

равлением, позволяющий в соответствии с компьютерными программами выполнять передвижение соответствующего источника нагрева по заданной траектории наплавки [4]. Следует отметить, что при постоянном токе основной дуги скорость движения плазмотрона практически полностью определяет погонную энергию, которая является одной из наиболее важных характеристик процесса плазменной порошковой наплавки. В конечном результате такая величина погонной энергии оказывает решающее влияние на физико-механические свойства и геометрические размеры наплавленного слоя.

Анализ микроструктуры проводился на травленых шлифах в сечениях перпендикулярно поверхности с использованием оптического микроскопа Neophot-2, измерения микротвердости — на микротвердомере ПМТ-3, элементный анализ — на электронном микроскопе SEM 515, укомплектованном приставкой EDAX.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Как при плазменной, так и лазерной наплавке порошковый питатель и сопловые устройства должны обеспечить стабильную подачу необходимого количества ППМ в сварочную ванну и равномерное его распределение по объёму наплаваемого покрытия. Размеры зоны ввода ППМ не должны превышать размеров зеркала сварочной ванны (зоны жидкого металла), так как в противном случае будут возникать большие непроизводительные потери порошка.

Промежуточные слои должны обеспечивать плавное изменение свойств (твёрдости, пластичности, коэффициента термического расширения и др.) между основным и наплавленным металлами. Основными критериальными факторами при этом являются твёрдость  $H_{\mu}$ , состав и структура наплавленного слоя и основного металла, необходимость последующей термической обработки и др. Микроструктура выбранного в качестве буферного сплава на никелевой основе системы Ni-Cr-B-Si с твёрдостью, промежуточной между твёрдостью стальной основы и наплавленного композиционного покрытия состоит из твёрдого раствора на основе никеля ( $\gamma - Ni$ ), карбидов и боридов хрома и др. Структурная чувствительность к условиям термообработки и высокое сродство сплава к стальной подложке позволяют изменять свойства промежуточного слоя в нужном направлении. Сплавы на основе никеля показывают очень хорошую стойкость к абразивному износу, высокотемпературную и коррозионную стойкость.

В результате выполненных нами экспериментов подтвердилась правильность выбранных технических и конструкторских подходов и решений при модернизации плазмотрона для наплавки. В целях восстановления и упрочнения различных быстроизнашивающихся деталей из конструкционных материалов проведена подготовка комплекса всего оборудования для плазменно-порошковой наплавки [9]. Созданный комплект оборудования для поверхностной наплавки открывает возможность реализовать плазменную наплавку коррозионно- и износостойкого порошкового материала на тонкостенные и/или клиновидные детали типа дисков и ножей различной сельскохозяйственной техники, например, измельчающих ножей кормоуборочного комбайна.

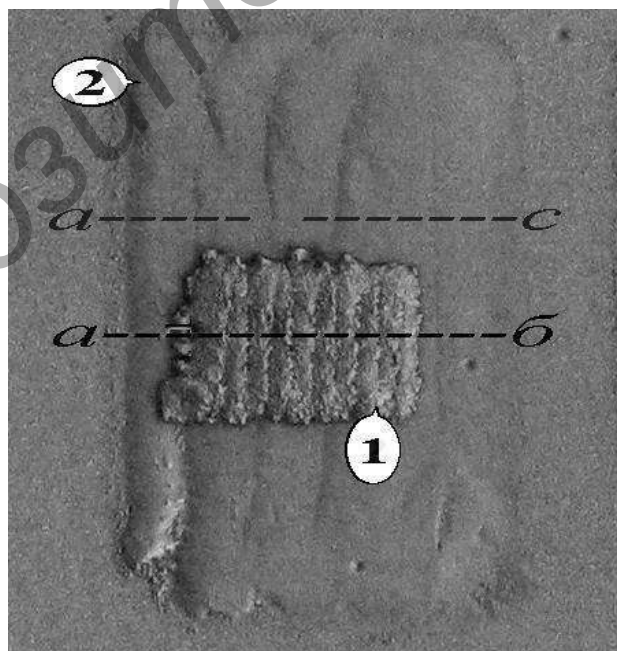
На основании проведенных экспериментов установлено, что хорошее качество наплавленных слоев наблюдалось для всех использованных самофлюсующихся порошков обоими способами. При оптимальных условиях микротвердость слоя наплавки для порошков ПГ-12Н-01, ПГ-10Н-01, ПС-12НВК-01 и Т-Термо 650 составляла, соответственно,  $\sim 550 HV_{0,1}$ ,  $830 HV_{0,1}$ ,  $(700 \dots 860) HV_{0,1}$ ,  $(900 \dots 1300) HV_{0,1}$ . Отмечено, что при глубокой зоне подплавления происходит интенсивное перемешивание наплаваемого материала с материалом основы, что сказывается на свойствах наплавленного слоя. При этом для порошков с добавками карбида вольфрама с уменьшением скорости сканирования луча возрастает как глубина оплавленного слоя, так и его микротвердость. Это говорит о том, что, несмотря на перемешивание материала порошка и основы, в расплаве происходит растворение частиц карбида

вольфрама, что, в свою очередь, ведет к дополнительному упрочнению, причем из результатов микрорентгеноспектрального анализа следует, что весьма существенным фактором в этих случаях является газовая среда, в которой проводится лазерная наплавка [10]. Были также определены оптимальные скорости лазерной наплавки в режимах «челночного типа».

При их превышении ( $v_n \geq 10$  мм / с) при установленных размахе ( $2A = 6$  мм) колебаний, мощности ( $W_n \sim 600$  Вт) лазерного излучения, расходе ( $G_n \sim 4$  г / мин) используемого присадочного порошка на никелевой основе формировались наплавленные валики седлообразного типа с наибольшим проплавлением металла основы в месте поворота лазерной головки. Показано, что при такой лазерной наплавке только за один проход можно создавать покрытия с достаточно стабильными шириной (8...13 мм) и толщиной (до 1 мм), с приемлемой глубиной подплавления металла основы ( $\sim 0,1 \dots 0,15$  мм) и регламентированной для используемого порошкового материала твердостью.

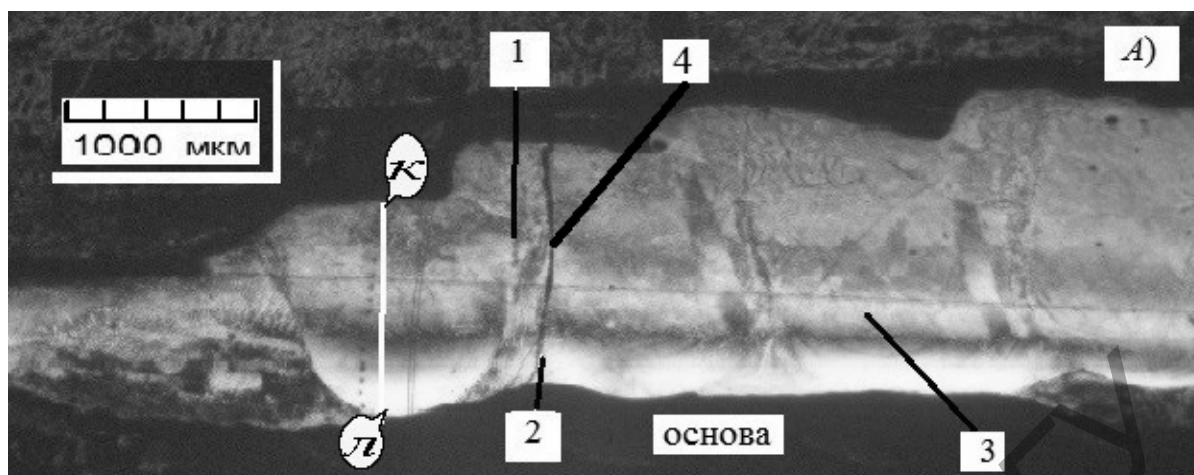
Изучение особенностей использования процессов лазерного воздействия в сочетании с плазменной обработкой поверхности позволило выявить следующее. На рисунке 1 показан внешний вид поверхности, наплавленной с использованием порошка ПГ-10Н-01 последовательно во времени: на исходную подложку плазмотроном 2, а затем лазером 1. Шлиф вырезался по линии  $a-b$  перпендикулярно поверхности подложки и в зависимости от выявления определённой структуры протравливался в растворах марбле или нитале (рисунок 2). В обоих случаях наплавка производилась при колебаниях источника нагрева челночного типа.

Размах колебаний плазмотрона  $2A = 25$  мм с шагом  $\delta = 2$  мм, максимальной скоростью  $v_n = 300$  мм / мин и, соответственно, для лазерной наплавки:  $2A = 6$  мм,  $\delta = 1$  мм,  $v_n = 300$  мм / мин. Из рисунков 1 и 2 можно определить геометрические размеры наплавленных слоёв: максимальная толщина покрытия — 1,2 мм, в том числе плазменного (промежуточного) —  $\sim 0,3$  мм.

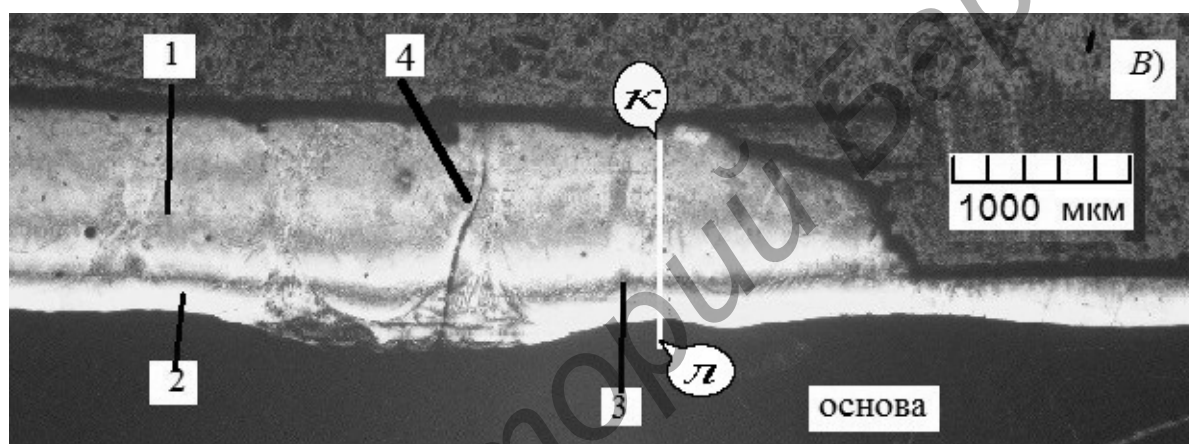


**Рисунок 1.** — Вид наплавленной поверхности плазмотроном 2 и лазером 1  $\times 3,5$ ;  $a-b$ ,  $a-c$  — линии разреза

*Примечания.* 1. Направления наплавки  $\leftarrow$  и движения лазерного луча  $\uparrow \downarrow \uparrow$ .  
2. Направления наплавки  $\rightarrow$  и движения плазмотрона  $\uparrow \downarrow \uparrow$ .



а)



б)

1 — лазерная наплавка; 2 — плазменная наплавка; 3 — зона (линия) сплавления лазерного и плазменного слоя; 4 — трещина

**Рисунок 2.** — Макрошлиф комбинированной наплавки: а — начало наплавки; б — конец наплавки, (к—л) — зона измерения микротвёрдости

*Примечание.* Направления наплавки → и движения луча лазера ⊗ ⊙ ⊗.

Поверхностная твёрдость, измеренная прибором ТК-2М, составила 44...46 HRC при твёрдости основы ~30 HRC, а ультразвуковым твёрдомером МЕТ-У1А — 49...54 HRC. Кроме упоминавшейся выше предполагаемой причины несоответствия результатов измерений (тонкое покрытие на относительно «мягкой» подложке) возможно также влияние пористости покрытий, их пространственной (локальной) неоднородности и других факторов. Поэтому в данных условиях, по-видимому, не может быть полного соответствия между измеренными значениями твёрдости тонкого приповерхностного слоя (МЕТ-У1А) и твёрдости композиции «покрытие—основа» (ТК-2М).

Микротвёрдость измерялась в поперечных шлифах по линии к—л в начале и конце наплавки (см. рисунок 2) и в средней части образца, не показанной на рисунке 2. Результаты измерений микротвёрдости в указанных зонах приведены на рисунке 3.

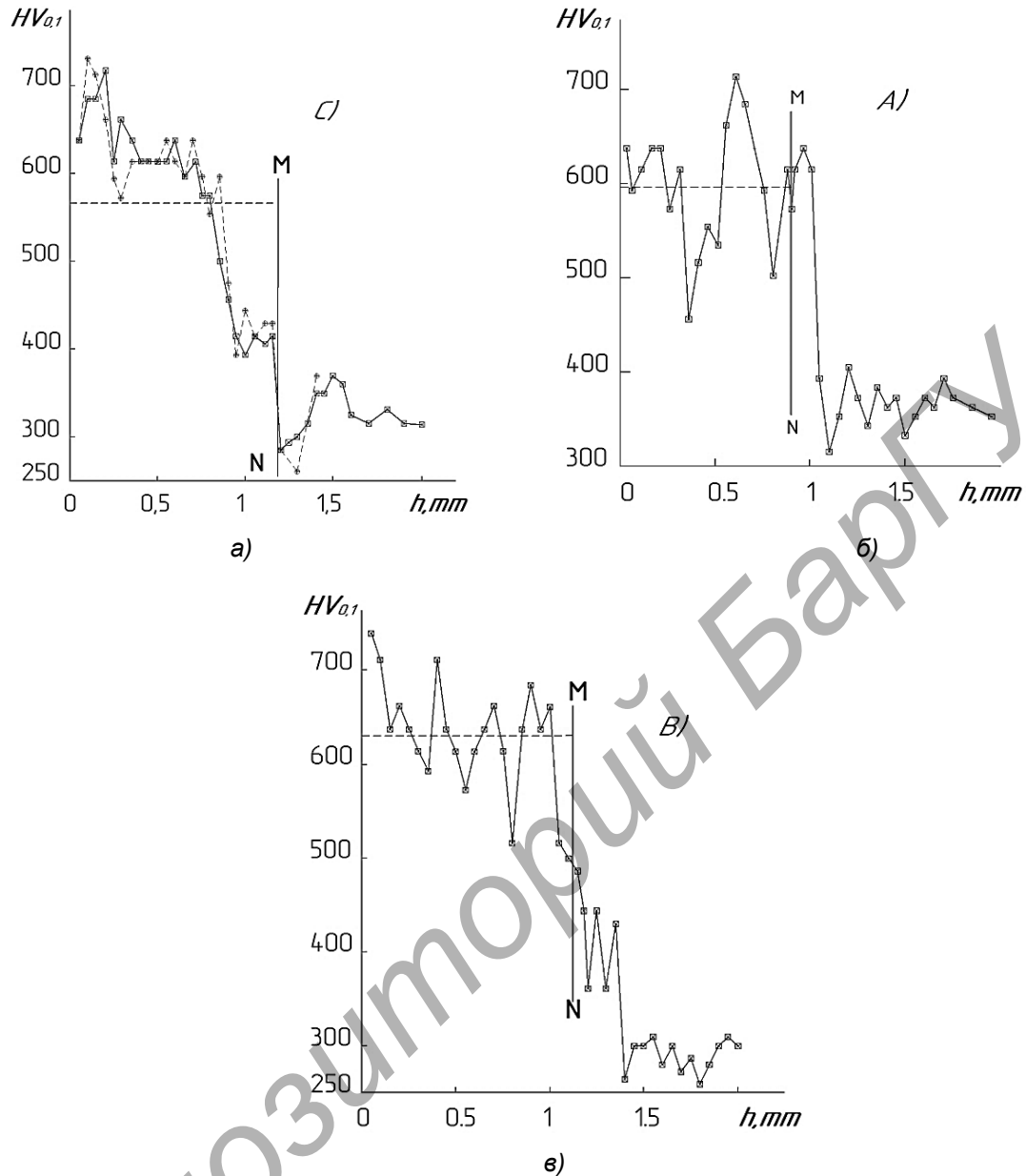


Рисунок 3. — Распределение микротвёрдости от поверхности по глубине наплавленного слоя: а — начало наплавки; б — середина; в — конец наплавки

Особенностью полученных распределений является сильная неоднородность (изрезанность) микротвёрдости не только наплавленных слоёв, но и прилегающих областей основного металла в зоне термического влияния с достаточно малым пространственным масштабом, достигающим до  $6 \cdot 10^3 HV_{0,1} / \text{мм}$  (см. рисунок 3, а), и обусловленная не только погрешностями измерений. С учётом сказанного и трудностями в оценке погрешностей измерений кривые строились посредством соединения экспериментальных точек прямыми, что преимущественно используется в других работах. На рисунке 3 штриховой горизонтальной линией отмечена средняя микротвёрдость наплавленных слоёв при аппроксимации её реального распределения ступенчатым с одинаковым шагом, равным 0,05 мм по толщине покрытия. Средняя микротвёрдость в начале (см. рисунок 3, а), середине (см. рисунок 3, б) и в конце (см. рисунок 3, в) лазерной наплавки по предварительно сформированному плазменно-порошковому подслою (см. рисунок 1) в пределах суммарной толщины покрытия (до

линии  $MN$ ), составляла, соответственно, 598  $HV_{0,1}$ , 576  $HV_{0,1}$  и 606  $HV_{0,1}$ . Наблюдаемая сильная неоднородность покрытий связана с наличием в наплавляемом композиционном порошковом сплаве компонентов с различной, в том числе достаточно высокой, твёрдостью (карбиды, бориды хрома и т. п.), не полностью растворившихся или вновь образовавшихся в процессе наплавки новых твёрдых соединений, неравномерно распределённых в объёме покрытия. По этой причине возникают определённые трудности при интерпретации распределений микротвёрдости по толщине покрытий. В середине лазерной наплавки (см. рисунок 3, б) достаточно надёжно зафиксировано падение измеренной величины микротвёрдости в направлении границы «покрытие—основа» (линия  $MN$ ) и менее заметное уменьшение в конце наплавки (см. рисунок 3, в). В обоих случаях на границе, в основном металле микротвёрдость падает до уровня  $\sim 270 HV_{0,1}$ . Основное влияние на характер представленных распределений оказывает, по-видимому, положение сечения измерения микротвёрдости относительно дорожек наплавки (см. рисунок 2): в центре дорожки, между дорожками или в зоне их перекрытия.

Наличие относительно тонкого промежуточного плазменного подслоя ( $\sim 0,3$  мм) не приводит к существенному изменению поверхностной твёрдости всей композиции «покрытие — основной металл» (48...50  $HRC$ ) по сравнению с твёрдостью лазерного слоя, имеющего примерно ту же толщину и наплавленного при той же скорости на «чистую», т. е. без подслоя, подложку (46...51  $HRC$ ). В исследованных шлифах регистрировалось незначительное количество пор (до 10 %) и несколько поперечных трещин на изображённом на рисунке 2 фрагменте 4 наплавленного образца. Трещины начинались на поверхности покрытия и достигали основы в том числе через промежуточный плазменный подслоя (см. рисунок 2, в). При выборе в качестве материала промежуточного слоя порошка ПГ-12Н-01 и основного (верхнего) слоя порошка ПГ-10Н-01 также формировался качественный переходной участок между ними, который выявлялся при травлении образцов в растворе марбле. Это обстоятельство, незначительное количество дефектов в виде пор, тенденция к снижению трещинообразования при соответствующем подборе твёрдости промежуточного подслоя и относительно высокая твёрдость полученной композиции «покрытие — основной металл» показывают возможность формирования, по крайней мере, двухслойной структуры при использовании самофлюсующихся порошковых сплавов. На основании экспериментов в случае использования для верхнего наплавленного слоя порошков типа ПС-12НВК-01 или Т-Термо 650 с твёрдостью до 65  $HRC$  следует рекомендовать в качестве промежуточных слоев использовать порошки с твёрдостью не выше, чем у порошков типа Т-Термо 20(24). При этом со снижением твёрдости промежуточного слоя может быть уменьшена и его толщина до уровня 50...100 мкм. С точки зрения трещинообразования такие рекомендации по выбору промежуточного и основного слоев, наплавленных с использованием лазерной и плазменно-порошковой наплавки или их комбинации, могут касаться также деталей, подвергаемых в дальнейшем термической закалке. В конечном итоге при такой комплексной обработке может быть значительно повышена производительность процесса наплавки. В этих целях вполне может быть использован разработанный в Физико-техническом институте НАН Беларуси комплекс лазерно-плазменного оборудования, когда эти два процесса реализуются на едином технологическом столе портального типа [4].

**Заключение.** С использованием лазерной наплавки на основе никелевых самофлюсующихся порошков по предварительно сформированному плазменному подслою показана возможность получения двухслойной композиции необходимой твёрдости с качественной зоной сплавления. Наличие промежуточного плазменного подслоя ( $h_n \sim 0,3$  мм) при лазерной наплавке не приводит к существенному изменению поверхностной твёрдости всей композиции «покрытие — основной металл» (48...50  $HRC$ ) по сравнению с твёрдостью только одного лазерного слоя той же толщины (46...51  $HRC$ ). При использовании в качестве материала

промежуточного и основного слоя одного порошка (ПГ-10Н-01) формируется качественный переходной участок между ними с минимальным уровнем дефектов (пор, трещин) в наплавленных слоях, не распространяющихся в основной металл. С повышением твердости основного наплавленного слоя рекомендовано в качестве материала для промежуточного подслоя выбирать самофлюсующиеся порошки на никелевой основе с твердостью 25 HRC и ниже.

#### Список цитируемых источников

1. Плазменная наплавка металлов / А. Е. Вайнерман [и др.]. — Л. : Машиностроение, 1969. — 190 с.
2. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюрин ; под ред. А. Г. Григорьянца. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с.
3. Рябцев, И. А. Наплавка деталей машин и механизмов / И. А. Рябцев. — Киев : ЭкоТехнология, 2004. — 160 с.
4. Астапчик, С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. — Минск : Беларус. наука, 2008. — 252 с.
5. Чирков, А. М. Техничко-экономический анализ гибридной технологии наплавки лазерно-плазменным методом / А. М. Чирков, Ю. А. Хрусталёв // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей : материалы 8-й Междунар. практ. конф. — СПб. : СППУ, 2008. — С. 318—327.
6. Бабей, Ю. И. Поверхностное упрочнение металлов / Ю. И. Бабей, Б. И. Бутаков, В. Г. Сысоев. — Киев : Наук. думка, 1995. — 256 с.
7. Романчук, И. А. Особенности формирования упрочняющих покрытий при лазерной порошковой наплавке / И. А. Романчук, В. С. Голубев, И. И. Вегера // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2020. — Кн. 2. — С. 43—52.
8. Романчук, И. А. Особенности формирования упрочняющих покрытий при плазменной порошковой наплавке / И. А. Романчук, В. С. Голубев, И. И. Вегера // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XXVII Междунар. науч.-техн. конф. — Севастополь, 2020. — С. 342—345.
9. Плазменная наплавка износостойких порошковых материалов на рабочие поверхности стальных деталей / А. В. Алифанов [и др.] // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2018. — Вып. 6. — С. 39—44.
10. Лазерная обработка материалов с изменением химического состава поверхностного слоя / В. С. Голубев [и др.] // Вестник БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2019. — Вып. 7. — С. 34—42.

Поступила в редакцию 12.04.2021.

УДК 631.3

**В. А. Бурдейко<sup>1</sup>, В. Б. Ловкис<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,  
Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи,  
Республика Беларусь, +375 (29) 562 74 05, V\_A\_Victor@mail.ru

<sup>2</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, пр-т Независимости, 99,  
220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 373 06 72 dekanat\_amf@bsatu.by

### **РАСЧЕТ ЩЕТОК МАШИНЫ ДЛЯ СБОРА КОЛОРАДСКОГО ЖУКА**

Целью настоящей работы является усовершенствование конструкции машины для сбора колорадского жука. При проектировании данной машины необходимо рационально выполнить компоновку ее составных частей. Правильная установка рабочих органов влияет одновременно на производительность и качество работы машины. Наиболее эффективными рабочими органами явились конические и прямолинейные щетки, гофрированные боковины и отбойник. Так как коническая щетка имеет наиболее сложную конструкцию по сравнению с другими рабочими органами, необходимо произвести расчет ее параметров.

Приведена методика расчета щетки машины для сбора колорадского жука. Представлены формулы для определения шага и количества ворсинок в целях получения оптимальной конструкции щетки. Разработана номограмма для расчета параметров конических щеток.

**Ключевые слова:** возделывание экологически чистого картофеля; колорадский жук; машина; конструкция; рабочий орган; щетка; ворсинки; расчет.

Рис. 2. Библиогр.: 11 назв.

**V. A. Burdejko<sup>1</sup>, V. B. Lovkis<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus,  
21 Voikov Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 562 74 05, V\_A\_Victor@mail.ru  
<sup>2</sup>Belarusian State Agrarian Technical University, Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus,  
99 Independence Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 373 06 72, dekanat\_amf@bsatu.by

### **CALCULATION OF THE BRUSHES OF THE COLORADO BEETLE HARVESTING MACHINE**

The purpose of this work is to improve the design of the machine for collecting the Colorado potato beetle. When designing this machine, it is necessary to rationally perform the layout of its components. The correct installation of the working bodies affects both the productivity and the quality of the machine. The most effective working bodies were conical and rectilinear brushes, corrugated sidewalls and a bump. Since the conical brush has the most complex design in comparison with other working bodies, it is necessary to calculate its parameters. The method of calculating the brush of the machine for collecting the Colorado beetle is given. Formulas for determining the pitch and number of villi in order to obtain an optimal brush design are presented. A nomogram for calculating the parameters of conical brushes has been developed.

**Key words:** cultivation of organic potatoes; Colorado potato beetle; machine; construction; working body; brush; villi; calculation.

Fig. 2. Ref.: 11 titles.

**Введение.** Зеленая экономика уже давно стала центральной темой в глобальной повестке дня производства сельскохозяйственных продуктов. Беларусь не отстает от мирового тренда: 9 ноября 2018 года был подписан Закон Республики Беларусь № 144-З «О производстве и обращении органической продукции» [1]. В главе 1 «Общие положения» (ст. 4) говорится, что «объектами отношений в области производства и обращения органической продукции являются: семена; процессы производства и обращение органической продукции».

На сегодня в нашей стране для технического обеспечения инновационных технологий производства картофеля имеются современные машины, установки и оборудование производства Республики Беларусь. По-прежнему при выращивании картофеля остро стоит проблема уничтожения колорадского жука, особенно в тех случаях, когда необходим экологически чистый картофель.

Колорадский жук — опасный вредитель всех пасленовых культур: картофеля, томатов, баклажанов и перца. В настоящее время в мире разработаны и применяются различные методы и средства для сбора и уничтожения колорадского жука. При выращивании экологически чистого картофеля для сбора и уничтожения колорадского жука возможно применение агротехнических, биологических, технических, физических и химических методов и средств.

Для сбора колорадского жука с посадок картофеля авторами из Беларуси, ближнего и дальнего зарубежья изобретены и сконструированы машины с различными рабочими органами. Многие из них имеют ряд существенных недостатков, таких как сложность конструкции, значительное энергопотребление, повышенная металлоемкость и невысокое качество работы [2—6].

При конструировании машины для сбора колорадского жука необходимо рационально выполнить расстановку ее составных частей. Правильное крепление рабочих органов влияет одновременно на производительность и качество работы машины. Наиболее эффективными рабочими органами явились конические и прямолинейные щетки. Коническая щетка имеет наиболее сложную конструкцию по сравнению с другими рабочими органами, поэтому следует произвести расчет ее параметров [7—9].

**Материалы и методы исследования.** В качестве методов исследования выступают основные положения системного анализа, физического и математического моделирования, теоретической механики, теории планирования эксперимента.

**Результаты исследования и их обсуждение.** *Расчет параметров щетки машины для сбора колорадского жука.* Для расчета параметров конических щеток обратимся к расчетной схеме (рисунок 1), где показан ротор (коническая щетка), который перемещается поступательно со скоростью машины  $V$  и вращается с угловой скоростью  $\omega$ .

Поместим начало подвижной системы координат в центр ротора в начальный момент  $t = 0$ , а ось  $Y$  направим в сторону поступательного движения машины. По периметру каждой конической щетки расположены ворсинки щеток с шагом  $B$ . Средняя линейная щетка сгребает колорадских жуков с картофельной ботвы площади  $aa'b'b$ , а соседняя — с площади  $cc'd'd$  и т. д.

Для качественного выполнения технологического процесса линейными щетками необходимо, чтобы между этими площадями не оставалось промежутков. Достигается это при определенном соотношении поступательной и вращательной скоростей щеток, их среднего диаметра  $D = 2R$ , числа щеток  $z$  и шага расположения ворсинок  $B$ , установленных на каждой щетке, входящей в комплект конической щетки (ротора).

Для выполнения этого условия траектория конца средней щетки (точка  $a$ ) должна касаться траектории начала второй щетки (точка  $d$ ), т. е. максимальные ординаты этих траекторий должны быть равны между собой:  $Y_{a\max} = Y_{d\max}$ .

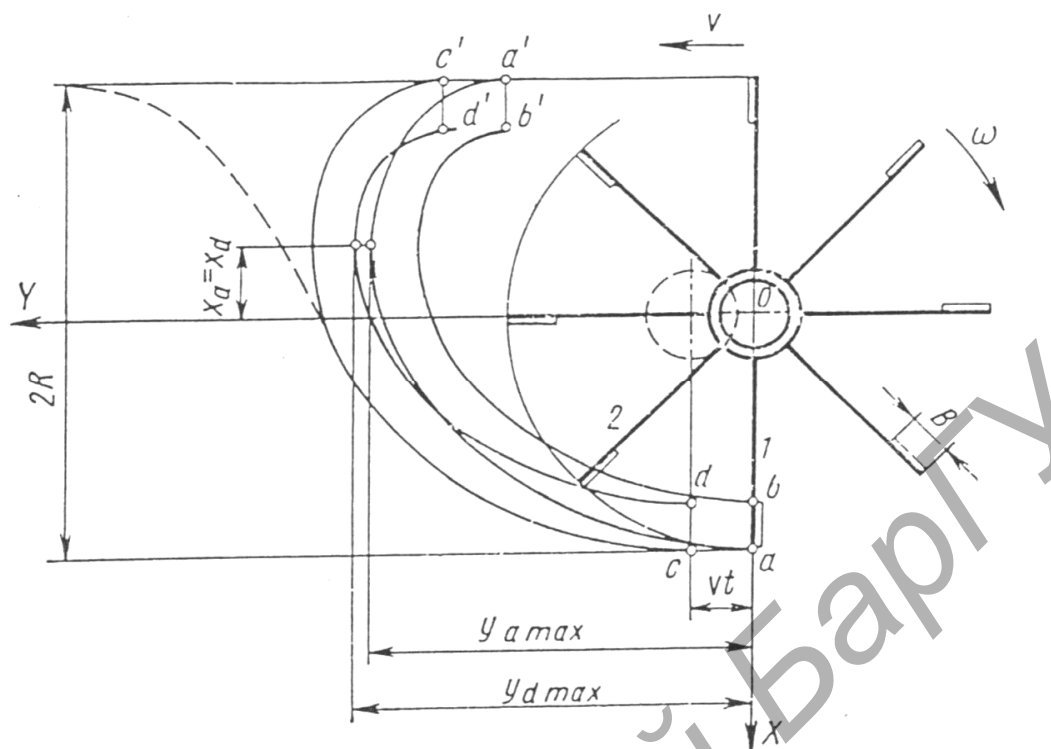


Рисунок 1. — Расчетная схема конических щеток

Введем обозначения

$$V / (\omega R) = \lambda \text{ и } (R - B) / R = k,$$

где  $V$  — поступательная скорость машины;

$R$  — радиус ротора;

$B$  — шаг расположения ворсинок [10].

Получим условие касания траекторий в следующем виде:

$$2\pi\lambda / z = \sqrt{1 - \lambda^2} - \sqrt{k^2 - \lambda^2} - \arccos\left(\frac{1}{K}\lambda^2 + \sqrt{1 - \lambda^2} \cdot \sqrt{k^2 - \lambda^2}\right), \quad (1)$$

где  $z$  — число щеток на машине.

Поскольку из уравнения нельзя получить зависимость ширины захвата щетки от других параметров в явном виде, оно было решено численными методами. Результат решения представлен в виде номограммы (рисунок 2). На графиках, построенных для ротора единичного радиуса  $R$ , заштрихованная линия ограничивает область существования решений уравнения.

При проектировании конических щеток в качестве рабочих органов машины для сбора колорадского жука расчеты их параметров и параметров их рабочих элементов необходимо выполнять по формуле (1). Количество прямолинейных щеток, установленных на ротор (называемый «коническая щетка»), определяется по номограмме для расчета параметров конических щеток. Количество щеток, устанавливаемых на ротор, должно быть четным, а их расположение — симметрично противоположащим. Перед установкой щеток производится их взвешивание в целях балансировки ротора.

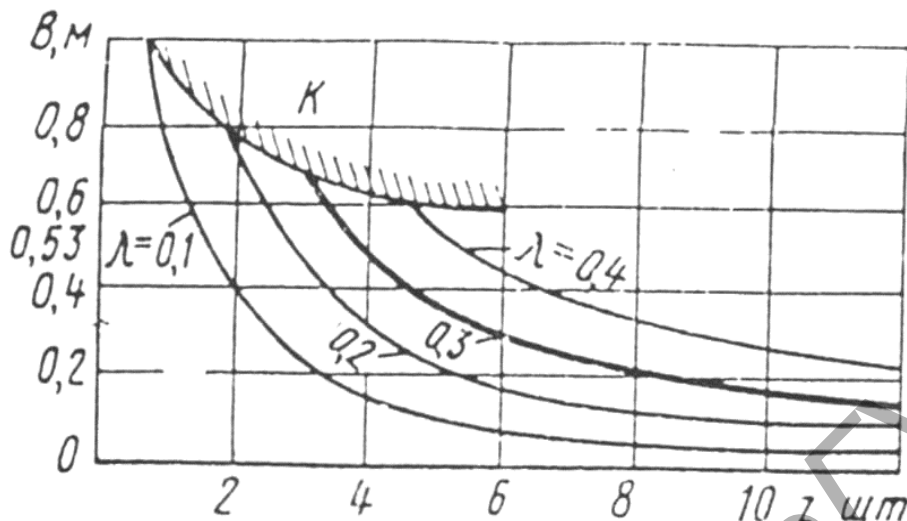


Рисунок 2. — Номограмма для расчета параметров конических щеток [10]

Расчет количества ворсинок щетки. Цилиндрические щетки, удаляя особи и личинки колорадского жука, направляют их в большинстве непосредственно в желоб. Для повышения качества работы щетки необходимо подобрать ее оптимальные параметры. Конструкции этих щеток различаются расположением ворса на каркасе. В щетках первого вида ворс размещен равномерно; щетки второго вида собраны из отдельных метелок, обычно в количестве шести-восьми штук.

Количество ворсинок  $i_{в.ц}$  (шт.), которое необходимо разместить на цилиндрической щетке, рассчитывается по формуле

$$i_{в.ц} = L2\pi K_p / (d\beta K_k),$$

где  $L$  — ширина рабочей полосы щетки, см;

$K_p$  — коэффициент, учитывающий равномерность размещения ворса на сердечнике,  $K = 2 \dots 2,5$ ;

$d$  — диаметр ворсинки, см;

$\beta$  — угол, определяющий часть ворса, находящегося в контакте с картофельной ботвой, рад;

$K_k$  — кинематический коэффициент, равный  $1,5 \dots 2$  [12].

При использовании ворса из стальной проволоки  $d = 0,04 \dots 0,06$  см, а из капронового моноволокна —  $d = 0,22 \dots 0,24$  см.

Экспериментальные исследования движения ворсинок при работе показывают, что  $\beta = 2,6\beta_1$ , где  $\beta_1 = \arccos(r - \Delta L / r)$ , где  $r$  — радиус щетки, см;  $\Delta L$  — деформация ворса, зависящая от твердости и густоты картофельной ботвы,  $\Delta L = 1,5 \dots 2,5$  см.

Кинематический коэффициент  $K_k = v_{ш} / v_m$ , где  $v_{ш}$  — окружная скорость периферийных концов ворса щетки, м / с;  $v_m$  — рабочая скорость машины при работе, м / с.

Коэффициент  $K_k$  — переменная величина, зависящая от износа ворса. Поэтому у новых щеток  $K_k = 2$ , у изношенных щеток  $K_k = 1,1 \dots 1,2$ .

Цилиндрические щетки второго вида работают на повышенных скоростях, в связи с чем  $K_k = 4 \dots 5$ .

Определение количества ворса для щеток этой конструкции имеет особенности. Такая щетка состоит из отдельных метелок. Поэтому необходимо соблюдение следующего граничного условия: путь, который проходит щетка при контакте с картофельной ботвой, должен быть больше расстояния, на которое переместится машина за период времени между контактами расположенных рядом метелок с ботвой.

Это условие приближенно имеет следующий вид:

$$r(\sin \beta_1 + \sin 0,6\beta_1) + v_m, 2,6\beta / \omega > \beta_c / \omega,$$

где  $\omega$  — угловая скорость щетки, рад / с;

$\beta_c$  — угол между метелками, рад [11].

Для обеспечения высококачественного вычесывания путем перекрытия метелками рабочей полосы рекомендуется  $\beta_c \approx \beta$ . Для определения количества ворса используется формула

$$i_{в.ц} = LK_{pi} / d, \quad (2)$$

где  $i$  — число метелок;

$K_p = 4 \dots 6$  [11].

**Заключение.** При проектировании щеток в качестве рабочих органов машины для сбора колорадского жука расчеты как их параметров, так и параметров их рабочих элементов необходимо выполнять по вышеприведенным формулам. Расчет количества ворса выполняется по формуле (2).

#### Список цитируемых источников

1. О производстве и обращении органической продукции [Электронный ресурс] : Закон Респ. Беларусь, 9 нояб. 2018 г., № 144-З : принят Палатой представителей 2 окт. 2018 г. : одобр. Советом Респ. 24 окт. 2018 г. // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. — 17.11.2018. — 2/2582.
2. Тележка для сбора колорадского жука [Электронный ресурс] : пат. U20070400 Респ. Беларусь : МПК А01М5/00 / В. К. Пестис, Э. В. Заяц, С. Н. Ладутько, П. П. Казакевич, П. В. Заяц ; заявитель и патентообладатель Гродн. гос. аграр. ун-т // База патентов Беларуси. — Режим доступа: <http://bypatents.com/>. — Дата доступа: 10.09.2020.
3. Устройство механического сбора вредных насекомых, их личинок или семян [Электронный ресурс] : пат. РФ 2390127 : МПК А01М5/04 / В. А. Парамошко // Руконт. — Режим доступа: <http://rucont.ru/>. — Дата доступа: 10.09.2020.
4. Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин / Е. С. Босой [и др.] ; под ред. Е. С. Босого. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1997. — 568 с. : ил.
5. Заяц, П. В. Комбинированный агрегат для получения экологически чистого картофеля / П. В. Заяц, Э. В. Заяц // Сельское хозяйство — проблемы и перспективы : сб. науч. тр. : в 4 т. / М-во сел. хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь ; Гродн. гос. аграр. ун-т / под ред. В. К. Пестиса. — Т. 1 : Сельскохозяйственные науки (агрономия). — С. 185—191.
6. Устройство для сбора колорадского жука [Электронный ресурс] : пат. РФ № 2202883 : МПК 7 А01М5/04 / Н. В. Бышов, И. Б. Тришкин, В. Д. Липин, В. В. Важинский, В. П. Топилин, Т. В. Липина / заявитель и патентообладатель Ряз. гос. агротехнол. ун-т им. П. А. Костычева // Информ. портал рос. изобретателей. — Режим доступа: <http://bankpatentov.ru/>. — Дата доступа: 10.09.2020.
7. Бурдейко, В. А. Результаты предварительных испытаний новых рабочих органов машины для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко, И. В. Дубень // Техника и технологии : инновации и качество : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., 20 дек. 2018 г., Барановичи, Респ. Беларусь / редкол.: В. В. Климук (гл. ред.), Ю. Е. Горбач (отв. ред.) [и др.]. — Барановичи : БарГУ, 2018.
8. Бурдейко В. А. Машина и рабочие органы для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко, И. В. Дубень // Вестн.к БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2018. — Вып. 6. — С. 87—95.

9. *Бурдейко, В. А.* Перспективные рабочие органы машин для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко // Техника и технологии: инновации и качество : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., 18 дек. 2015 г., Барановичи, Респ. Беларусь. — Барановичи : БарГУ, 2015. — С. 7—8.

10. *Бурдейко, В. А.* Расчет параметров конических щеток машины для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко // Техника и технологии: инновации и качество : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., 20 дек. 2019 г., Барановичи, Респ. Беларусь / редкол.: В. В. Климук (гл. ред.), Ю. Е. Горбач (отв. ред.) [и др.]. — Барановичи : БарГУ, 2020.

11. *Шестопалов, К. К.* Взаимодействие ворса со смётотом и расчёт параметров цилиндрической щётки / К. К. Шестопалов, С. В. Штефан ; Моск. автомоб.-дорож. гос. техн. ун-т (МАДИ). — М. : МАДИ, 2010. — 16 с. : ил.

Поступила в редакцию 02.04.2021.

Репозиторий БарГУ

УДК 631.348

**П. В. Заяц<sup>1</sup>, П. П. Казакевич<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», ул. Кнорина, 1, 220049 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 634 06 01, p\_zayats@tut.by

<sup>2</sup>Национальная академия наук Беларуси, пр-т Независимости, 66, 220072 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 676 71 04, kazakevich@presidium.bas-net.by

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАШИНЫ ДЛЯ СБОРА КОЛОРАДСКОГО ЖУКА

В результате исследований были обоснованы параметры и режимы работы упруго-эластичных роторов с регулятором амплитуды колебаний, а также машины для механического сбора колорадского жука при выращивании экологически чистого картофеля.

Предварительными теоретическими исследованиями установлены факторы влияния конструктивно-режимных параметров рабочего органа и состояния ботвы на качественные показатели сбора колорадского жука.

**Ключевые слова:** машина для сбора колорадского жука; рабочий орган; конструктивно-режимные параметры; упруго-эластичные роторы; амплитуда колебаний; экологически чистый картофель; сбор; стряхивание; лопасть; картофельная ботва.

Рис. 3. Табл. 6. Библиогр.: 14 назв.

**P. V. Zayats<sup>1</sup>, P. P. Kazakevich<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Republican Unitary Enterprise “Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization”, 220049, Minsk, 1 Knorina Str., the Republic of Belarus, +375 (29) 634 06 01, p\_zayats@tut.by

<sup>2</sup>The National Academy of Sciences of Belarus, 66 Independence Ave., 220072 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (29) 676 71 04, kazakevich@presidium.bas-net.by

## RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES COLORADO BEETLE HARVESTING MACHINES

As a result of the studies, the parameters and operation modes of elastic rotors with an oscillation amplitude regulator, as well as machines for mechanical collection of Colorado beetle when growing environmentally friendly potatoes, were substantiated.

Preliminary theoretical studies have established the factors of the influence of structural-mode parameters of the working body and the state of the potato vine on the qualitative indicators of the collection of the Colorado beetle.

**Key words:** Colorado beetle collecting machine; working body; design-mode parameters; elastic rotors; vibration amplitude; environmentally friendly potatoes; collection; shaking; blade; potato vine.

Fig. 3. Table 6. Ref.: 14 titles.

**Введение.** Борьба с колорадским жуком — один из решающих факторов достижения высокой урожайности картофеля. Экономическим порогом вредоносности жука в Республике Беларусь, при котором происходит снижение урожайности культуры, является заселение вредителем 10 % и более растений с преобладающей численностью порядка 18...20 особей и более на куст в период массового появления личинок первого—третьего возрастов при дефиците влаги в период цветения или 26...28 личинок на куст в период бутонизации картофеля при достаточном количестве осадков.

При уходе за посадками картофеля для поддержания почвы в рыхлом и чистом от сорняков состоянии проводится рыхление междурядий. Применение комбинированных агрегатов для стряхивания и сбора колорадского жука с ботвы с одновременным рыхлением междурядий позволит сократить число проходов агрегатов по полю, уменьшить уплотнение почвы и снизить затраты [1—3].

Известны различные рабочие органы для стряхивания и сбора с ботвы картофеля колорадского жука. Однако их нельзя считать совершенными, так как остается нерешенным ряд задач, в том числе по обеспечению полноты сбора вредителя с растения [4—7]. Разработка средств механизации, позволяющих качественно и с наименьшими затратами выполнять технологические операции защиты посадок картофеля от колорадского жука, включая экологически безопасные методы, является актуальной.

Разработкой технических средств для машинного сбора насекомых и их уничтожения занимались ученые и изобретатели во многих странах, в том числе и в нашей республике.

Известен ряд таких машин и технических устройств [4; 5; 8—11]. По принципу работы их можно разделить на пневматические, пневмомеханические и щеточно-лопастные, или механические.

Работа пневматических машин основана на обдуве кустов картофеля воздушным потоком, сборе оторванных от ботвы особей жука в накопительные емкости и последующей утилизации собранной популяции. Подобные машины, как правило, состоят из устройства для обдува растений, включающего вентилятор, воздухопроводы, патрубки для сдува насекомых и устройства для их утилизации, состоящего из сборного желоба, экрана, и системы транспортирования насекомых.

Установлено, что при возделывании экологически чистого картофеля для детского питания, потребность в котором в Республике Беларусь составляет порядка 215 тыс. т в год, может применяться механический сбор особей колорадского жука с ботвы. При этом сбор должен выполняться на протяжении личиночной стадии вредителя, которая длится 2...4 недели (в среднем 16 суток), с периодичностью 5...8 дней, т. е. нужны, как правило, 2...3 обработки.

Обзор и анализ литературных источников показал, что перспективным направлением при механическом сборе жука является применение машины с упруго-эластичными роторами, обеспечивающей стряхивание и сбор особей насекомого с картофельной ботвы. Однако параметры и режимы работы рабочих органов такой машины недостаточно изучены и обоснованы.

Целью исследования является обоснование параметров и режимов работы упруго-эластичных роторов с регулятором амплитуды колебаний и машины для механического сбора колорадского жука при выращивании экологически чистого картофеля.

**Материалы и методы исследования.** При проведении многофакторных исследований ротора с упруго-эластичными лопастями и регулятором амплитуды их колебаний проведена серия опытов в целях выявления влияния конструктивно-режимных параметров рабочего органа и состояния ботвы на качественные показатели сбора колорадского жука. Теоретическими исследованиями установлены влияющие на оценочные параметры факторы: диаметр ротора, количество и ширина лопастей, параметры и взаимное расположение лотка и ротора, положение регулятора амплитуды колебания лопасти по высоте куста и радиусу ротора.

**Результаты исследования и их обсуждение.** В соответствии с целью исследований определяли влияние взаимодействия факторов (окружной скорости ротора  $V_{\text{окр}}$ , положения регулятора по радиусу ротора  $R_p$  и площади поперечного сечения лопасти  $S_{\text{лоп}}$ ) на остаточное количество особей жука на ботве после прохода машины (функция отклика  $N$ , таблица 1).

Т а б л и ц а 1. — Результаты проведения опыта

Номер опыта	Окружная скорость ротора $V_{окр}$ , м / с	Положение регулятора по радиусу ротора $R_p$ , см	Площадь поперечного сечения лопасти $S_{лоп}$ , мм <sup>2</sup>	Остаточное количество особей жука (по повторяемостям опыта и среднее значение)			
				$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_{ср}$
1	4,0	30	1 650	54	60	81	65
2	4,0	10	1 650	30	32	43	35
3	3,0	30	1 650	100	115	115	110
4	3,0	10	1 650	52	62	66	60
5	3,5	20	1 650	12	17	28	19
6	4,0	20	1 900	14	15	37	22
7	4,0	20	1 400	60	68	82	70
8	3,0	20	1 900	70	65	45	60
9	3,0	20	1 400	98	130	132	120
10	3,5	20	1 650	5	23	32	20
11	3,5	30	1 900	51	46	23	40
12	3,5	30	1 400	128	136	96	120
13	3,5	10	1 900	15	21	39	25
14	3,5	10	1 400	69	78	93	80
15	3,5	20	1 650	16	24	23	21

Результаты опытных данных обрабатывались на персональном компьютере с использованием электронных таблиц MS Excel в следующем порядке.

1. Определяли значения верхнего, среднего и нижнего уровней варьирования факторов с учетом их максимальных и минимальных значений в опыте (таблица 2).

2. Находили среднее значение и скорректированную дисперсию опытных значений функции отклика по следующим формулам:

$$Y_{ср} = \frac{1}{N'} \sum_{j=1}^{N'} Y_j, \quad S_Y^2 = \frac{1}{N'-1} \sum_{j=1}^{N'} (Y_j - Y_{ср})^2.$$

3. Проводили кодирование факторов (таблица 3) по формуле

$$x_{ij} = \frac{(X_{ij} - X_0)}{l_i},$$

где  $x_{ij}$  — кодированное значение  $i$ -го фактора в  $j$ -м опыте (строке плана);

$X_{ij}$  — натуральное значение фактора в  $j$ -м опыте;

$X_0$  — натуральное значение основного уровня  $i$ -го фактора;

$l_i$  — интервал варьирования  $i$ -го фактора.

Т а б л и ц а 2. — Значения уровней варьирования факторов

$x_1$	Окружная скорость ротора $V_{\text{окр}}$ , м / с	$x_2$	Положение регулятора по радиусу ротора $R_p$ , см	$x_3$	Площадь поперечного сечения лопасти $S_{\text{лоп}}$ , мм <sup>2</sup>
1	4,0	1	30	1	1 900
0	3,5	0	20	0	1 650
-1	3,0	-1	10	-1	1 400

Примечание.  $x_1, x_2, x_3$  — корреляционные факторы.

Т а б л и ц а 3. — Значения факторов в кодированном виде

Номер опыта	Значение фактора			Среднее значение функции отклика $Y_{\text{ср}}$	Дисперсия $S_y^2$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$		
1	1	1	0	65	201,0
2	1	-1	0	35	49,0
3	-1	1	0	110	75,0
4	-1	-1	0	60	52,0
5	0	0	0	19	67,0
6	1	0	1	22	169,0
7	1	0	-1	70	124,0
8	-1	0	1	60	175,0
9	-1	0	-1	120	364,0
10	0	0	0	20	189,0
11	0	1	1	40	223,0
12	0	1	-1	120	448,0
13	0	-1	1	25	156,0
14	0	-1	-1	80	147,0
15	0	0	0	21	19,0

4. Оценивали степень корреляции факторов  $x_i$  между собой с помощью инструмента «Корреляция» надстройки «Пакет анализа» (таблица 4).

Анализ корреляционной таблицы показывает, что благодаря ортогональности плана опыта взаимная корреляция факторов равна нулю.

Т а б л и ц а 4. — Корреляционная таблица факторов

Фактор	Значение фактора		
$x_1$	1	0	0
$x_2$	0	1	0
$x_3$	0	0	1

5. Проверили однородность дисперсий по критерию Кохрена по строкам плана при числе сравниваемых выборок  $m > 2$  [12, с. 134]:

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum S^2} \leq G_{\alpha, m, n'-1},$$

где  $G_{\alpha, m, n'-1}$  — табличное значение критерия Кохрена при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $m$  и  $n - 1$ ;

$n'$  — объем выборок.

Получили

$$G_p = 448 / 2458 = 0,182 \leq G_{\alpha, m, n'-1} = 0,57.$$

Следовательно, дисперсии однородны.

6. Вычисляли оценки  $b_0$ ,  $b_i$  и  $b_{hi}$  коэффициентов уравнений регрессии:

— линейная модель —

$$Y_p = b_0 + \sum_{j=1}^m b_j x_j;$$

— квадратичная модель —

$$Y_p = b_0 + \sum_{j=1}^m b_j x_j + \sum_{i,k=1}^m b_{ik} x_i x_k + \sum_{i=1}^m b_{ii} x_i^2,$$

где  $i, k \leq m$  — номер фактора в регрессионной зависимости.

Расчет коэффициентов регрессии производили по методу наименьших квадратов в матричном виде [13, с. 17]:

$$[B] = ([X_{\text{баз}}]^T [X_{\text{баз}}])^{-1} ([X_{\text{баз}}]^T [Y]),$$

где  $[B]$  — вектор искомых оценок коэффициентов регрессии;

$[X_{\text{баз}}]$  — матрица базисных функций;

$[X_{\text{баз}}]^T$  — транспонированная матрица базисных функций;

$[Y]$  — матрица-вектор средних опытных значений показателя  $Y_{\text{ср}}$ .

Матрицу базисных функций  $[X_{\text{баз}}]$  формировали на основе матрицы плана эксперимента, для чего ее дополняли первым столбцом из фиктивных элементов  $x_{0i} = 1$ , соответ-

ствующих постоянному члену уравнения регрессии  $b_0$ , а также столбцами, составленными из произведений факторов.

7. Определяли остаточную дисперсию соответствующей модели по формуле

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{N' - m'} \sum_{j=1}^{N'} (Y_{\text{сп}j} - Y_{\text{п}j})^2,$$

где  $m'$  — число коэффициентов в уравнении регрессии первого порядка,  $m' = 4$ .

8. Получали расчетное значение критерия  $F$ :

– при проверке модели первого порядка по формуле

$$F_0 = \frac{S_Y^2}{S_{\text{ост}1}^2};$$

– при проверке модели второго порядка по формуле

$$F_0 = \frac{S_{\text{ост}1}^2}{S_{\text{ост}2}^2};$$

9. Для линейной модели сравнивали расчетное значение критерия  $F$  с табличным  $F_{k_1, k_2, \alpha}$  при числе степеней свободы  $k_1 = N' - 1$ ,  $k_2 = N' - m'$  и уровне значимости  $\alpha = 0,05$  (таблица 5).

Т а б л и ц а 5. — Регрессионный анализ

Показатель	Модель	
	линейная	квадратичная
Число строк плана $N$	15	15
Число коэффициентов модели $m'$	4	10
Значения коэффициентов модели:		
$b_0$	57,80	20,00
$b_1$	-19,75	-19,75
$b_2$	16,88	16,88
$b_3$	-30,38	-30,38
$b_{12}$	—	-5,00
$b_{13}$	—	3,00
$b_{23}$	—	-6,25
$b_{11}$	—	24,63
$b_{22}$	—	22,88
$b_{33}$	—	23,38
Дисперсия воспроизводимости $S_B^2$	163,87	163,87

Окончание таблицы 5

Показатель	Модель	
	линейная	квадратичная
Остаточная дисперсия $S_{\text{ост}}^2$	613,3	55,93
Расчетное значение критерия $F_1$	3,743	0,341
Табличное значение критерия Фишера $F_{k_1, k_2, \alpha}$	3,7	5,8
при числе степеней свободы:		
$k_1$	11	5
$k_2$	2	2
Вывод	Модель неадекватна	Модель адекватна

Результат сравнения интерпретировался следующим образом:

– если  $F_0 \leq F_{k_1, k_2, \alpha}$ , то линейная модель не дает большего, чем модель нулевой степени, т. е. управляемые факторы не влияют на математическое ожидание отклика;

– если  $F_0 > F_{k_1, k_2, \alpha}$ , то значимость коэффициентов линейной модели необходимо подтвердить с помощью модели второго порядка.

10. Для адекватной квадратичной модели проводили проверку значимости коэффициентов полученных уравнений регрессии, для чего рассчитывали доверительный интервал по формуле

$$\Delta b_j = \pm \frac{z S_Y}{\sqrt{N'}}$$

где  $z$  — табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы  $k_1 = N' - m$ , при котором определялись значения коэффициентов регрессии соответствующей модели (здесь  $m$  — число коэффициентов в соответствующем уравнении регрессии);

$S_Y$  — среднеквадратическое отклонение опытных значений функции отклика, определяемое по формуле  $S_Y = \sqrt{S_Y^2}$ ;  $N'$  — число строк плана.

Если абсолютные значения коэффициентов регрессии больше соответствующих значений доверительного интервала ( $|b_j| > \Delta b_j$ ), то они являются значимыми и должны учитываться в модели, в противном случае коэффициент является незначимым и подлежит исключению. Результаты приведены в таблице 6.

Т а б л и ц а 6. — Проверка значимости коэффициентов регрессии

Показатель	Значение коэффициента	Доверительный интервал	Вывод
$b_0$	20,00	7,3907	Значим
$b_1$	-19,75	4,5259	Значим
$b_2$	16,88	4,5259	Значим
$b_3$	-30,38	4,5259	Значим

Окончание таблицы 6

Показатель	Значение коэффициента	Доверительный интервал	Вывод
$b_{12}$	-5,00	6,4005	Незначим
$b_{13}$	3,00	6,4005	Незначим
$b_{23}$	-6,25	6,4005	Незначим
$b_{11}$	24,63	6,6619	Значим
$b_{22}$	22,88	6,6619	Значим
$b_{33}$	23,38	6,6619	Значим

11. Так как незначимые коэффициенты регрессии не влияют на значение функции отклика, то они могут быть исключены из модели. Поскольку был принят ортогональный план опыта, то пересчет коэффициентов регрессии не требуется.

В результате получено следующее уравнение регрессии в кодированном виде:

$$Y_p = 20,00 - 19,75x_1 + 16,88x_2 - 30,38x_3 + 24,63x_1^2 + 22,88x_2^2 + 23,88x_3^2. \quad (1)$$

12. При раскодировании уравнения (1) получена зависимость функции отклика от параметров  $V_{\text{окр}}$ ,  $R_p$  и  $S_{\text{лоп}}$ :

$$N = 2641,3 - 739,0V_{\text{окр}} - 7,46R_p - 1,356S_{\text{лоп}} + 98,50V_{\text{окр}}^2 + 0,2288R_p^2 + 3,7 \cdot 10^{-4} S_{\text{лоп}}^2.$$

13. Коэффициент детерминации модели, характеризующий степень влияния регрессии на общую дисперсию опытных значений  $Y$ , определяли по следующей формуле [14]:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{pi} - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{cpi} - Y_{pi})^2 + \sum_{i=1}^n (Y_{pi} - \bar{Y})^2}.$$

Расчетом установлено, что  $r^2 = 0,973$ . Это говорит о высоком влиянии регрессии.

14. Относительную среднеквадратическую ошибку уравнения регрессии, близость которой к нулю является необходимым условием адекватности модели, определяли выражением

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{\sqrt{S_{\text{ост}}^2}}{\bar{Y}} 100 \%.$$

По расчету  $\delta_{\text{ср}} = 13,7 \%$ .

15. Проводили анализ полученных уравнений регрессии.

Установлены оптимальные значения параметров, обеспечивающие минимум целевой функции  $N = 3,1$  (рисунки 1—3):

- окружная скорость ротора  $V_{\text{окр}} = 3,7$  м / с;
- положение регулятора по радиусу ротора  $R_p = 16$  см;
- площадь поперечного сечения лопасти  $S_{\text{лоп}} = 1\,800$  мм<sup>2</sup>.

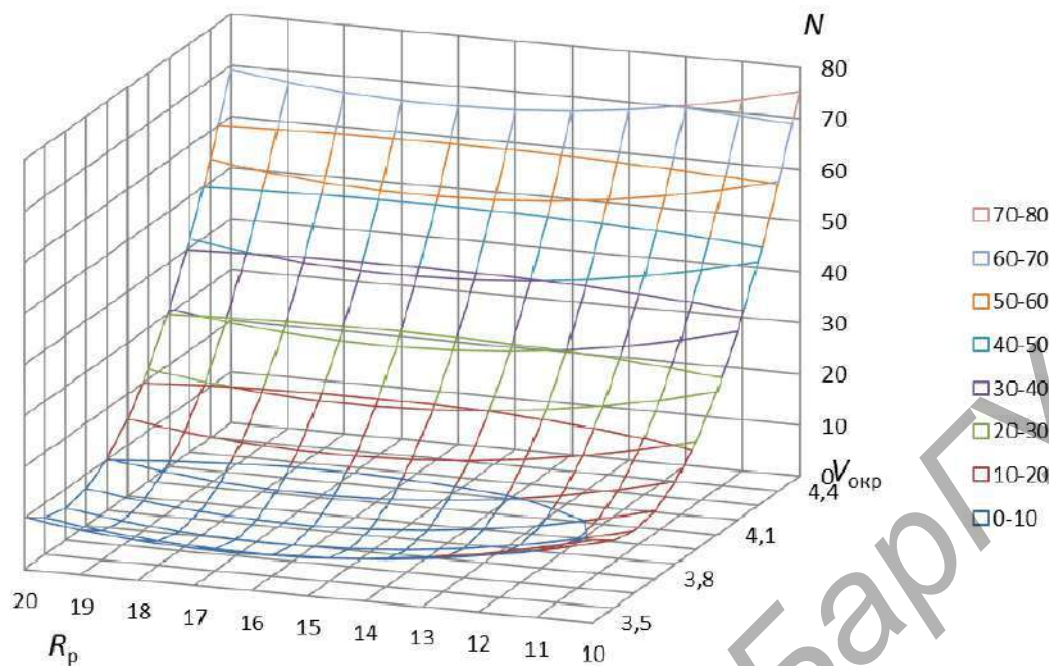


Рисунок 1. — Зависимость остаточного количества особей жука  $N$  от положения регулятора на радиусе ротора  $R_p$  и окружной скорости ротора  $V_{окр}$  при площади поперечного сечения  $S_{лоп} = 1\ 800\ \text{мм}^2$

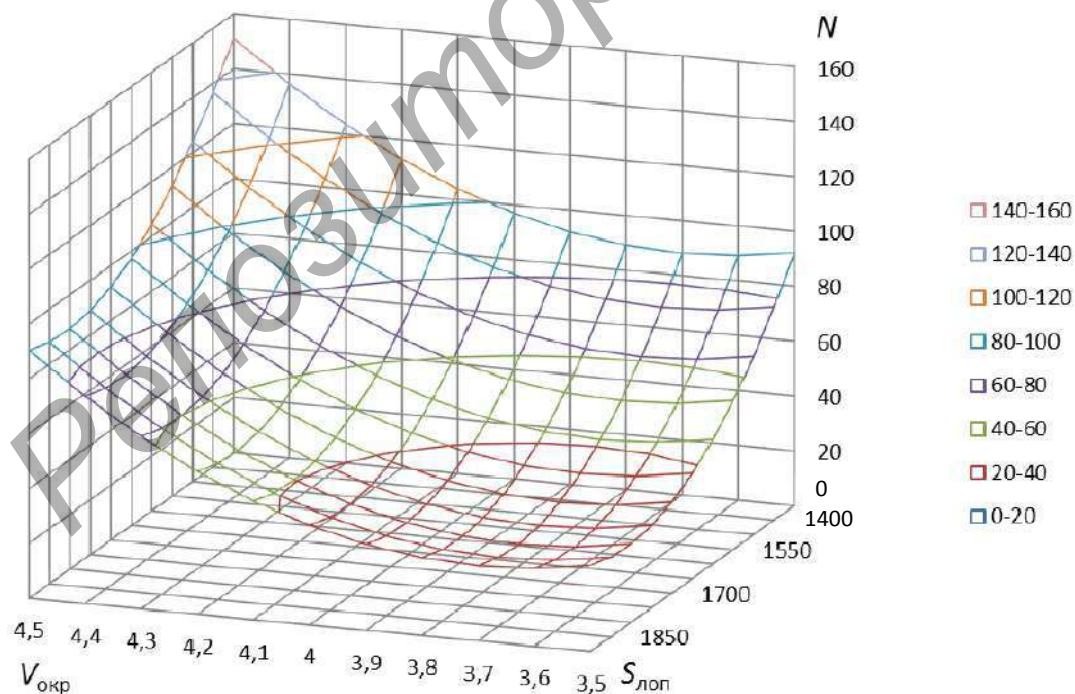
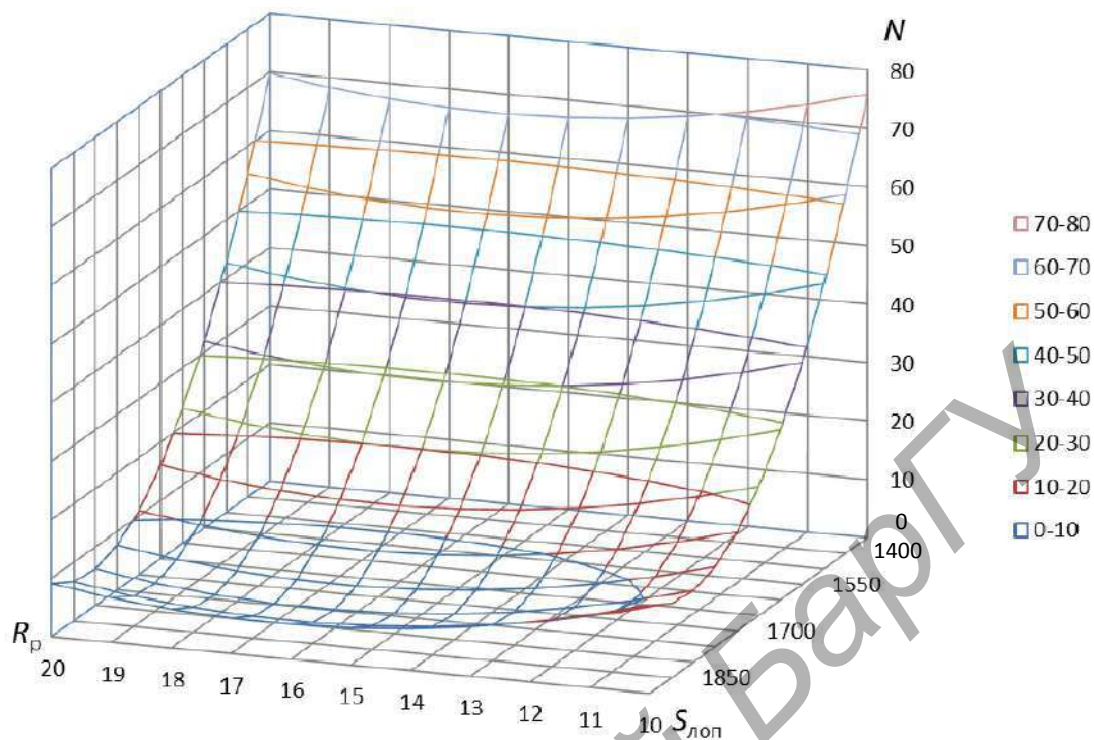


Рисунок 2. — Зависимость остаточного количества особей жука  $N$  от окружной скорости ротора  $V_{окр}$  и площади поперечного сечения лопасти  $S_{лоп}$  при положении регулятора на радиусе ротора  $R_p = 16\ \text{см}$



**Рисунок 3. — Зависимость остаточного количества особей  $N$  жука от положения регулятора на радиусе ротора  $R_p$  и площади поперечного сечения лопасти  $S_{\text{лоп}}$  при окружной скорости ротора  $V_{\text{окр}} = 3,7 \text{ м / с}$**

**Заключение.** Экспериментальными исследованиями и математической обработкой их результатов установлено, что теоретические расчёты согласуются с экспериментальными данными.

Определены физико-механические свойства особей колорадского жука и ботвы картофеля, позволившие обосновать выбор коэффициента пропорциональности концентрации особей вредителей по ярусам ботвы и уточнить вместимость накопительной ёмкости, запас рабочего хода агрегата и параметры пневматической системы

Исследованием зависимости точки приложения стряхивающего усилия по высоте ботвы картофеля в зависимости от силы ее упругости установлено, что в целях снижения энергоёмкости процесса целесообразно взаимодействие ротора с ботвой в ее верхушечной части, где имеет место максимальная концентрация особей колорадского жука.

Минимальное остаточное количество особей колорадского жука на ботве и отсутствие видимого ее повреждения достигаются при диаметре капроновых нитей лопасти  $1,2 \dots 1,5 \text{ мм}$ .

Установлены экспериментальные зависимости силы упругости лопастей и остаточного количества особей жука от положения регуляторов амплитуды колебаний лопастей, которые позволили определить, что рациональное по условию энергоёмкости положение регулятора от оси ротора составляет  $R_p = 0,14 \dots 0,18 \text{ м}$ .

Определена экспериментальная зависимость остаточного количества особей колорадского жука от окружной скорости ротора. При условии минимальной энергоёмкости процесса и без видимого повреждения листьев ботвы диапазон окружной скорости ротора должен составлять  $V_{\text{окр}} = 3 \dots 4 \text{ м / с}$ .

Получено уравнение регрессии второй степени, устанавливающее связь остаточного количества особей жука на ботве картофеля после прохода машины с параметрами и режимами работы рабочего органа: окружной скоростью ротора  $V_{\text{окр}}$ , положением регулятора на радиусе ротора  $R_p$  и сечением лопасти  $S_{\text{лоп}}$ .

Решением уравнения установлены оптимальные значения  $V_{\text{окр}} = 3,7$  м / с,  $R_p = 0,16$  м,  $S_{\text{лоп}} = 1\,800$  мм<sup>2</sup>.

#### Список цитируемых источников

1. Сонкина, Е. В. Мероприятия по ограничению вредоносности колорадского жука в посадках картофеля : аналит. обзор / Е. В. Сонкина, С. Л. Быховец // Беларус. науч. ин-т внедрения новых форм хозяйствования в АПК. — Минск, 2003. — 36 с.
2. Настольная книга картофелевода / В. Г. Иванюк [и др.] ; под ред. С. А. Турко // РУП «Науч.-практ. центр НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству». — Минск : Рэйплац, 2007. — 191 с.
3. Szolc, S. Ziemiak doceniony / S. Szolc // Farmer. — 2006. — № 22. — S. 40—42.
4. Кисняшкин, М. Ф. Обоснование параметров рабочих органов машины для борьбы с колорадским жуком : автореф. ... дис. канд. техн. наук : 052001 / 052003 / М. Ф. Кисняшкин // Морд. гос. ун-т им. Н. П. Огарева. — Саранск, 1996. — 23 с.
5. Устройство для сбора колорадских жуков и их личинок : пат. 3716 Респ. Беларусь : МКП А 01М 5/04 / Э. В. Заяц, С. Н. Ладутько, С. А. Дубатовка, И. И. Верстак ; заявитель Гродн. гос. с.-х. ин-т. — № 970148 ; заявл. 03.19.1997 ; дата публ.: 30.12.2000.
6. Заяц, Э. В. Результаты исследований рабочих органов для сбора колорадских жуков и их личинок / Э. В. Заяц, С. А. Дубатовка // Наука — производству : материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конф. / Гродн. гос. с.-х. ин-т. — Гродно, 2001. — Ч. 2. — С. 49—52.
7. Заяц, Э. В. К вопросу исследования активного рабочего органа для сбора колорадского жука / Э. В. Заяц, С. А. Дубатовка // Уч. зап. Гродн. гос. с.-х. ин-та. — Гродно, 1996. — Вып. VI. — С. 110.
8. Гуцол, Т. Д. Обоснование параметров и режимов работы устройства для сбора насекомых вредителей пропашных сельскохозяйственных культур : автореф. ... дис. канд. техн. наук : 05.20.01 / Т. Д. Гуцол // Подол. гос. аграр.-техн. ун-т. — Каменец-Подольский, 2006. — 24 с.
9. Устройство для сбора насекомых с растений : а. с. 1503724 СССР : МКУА01М5/08 / И. Ф. Гончаров [и др.] ; Укр. науч.-исслед. ин-т орошаемого земледелия. — № 4239810/30-15 ; заявл. 04.05.1987 ; дата публ.: 30.08.1990.
10. Устройство для сбора и уничтожения колорадского жука : а. с. 1423078 СССР : МКУ А01М 5/04 / С. К. Дерябин [и др.] ; Морд. гос. ун-т им. Н. П. Огарева. — № 3988488/30-15 ; заявл. 04.11.1985 ; дата публ.: 15.09.1988.
11. Машина для сбора колорадского жука [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.Bio-Landtechnik.de>. — Дата доступа : 04.12.2006.
12. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. — Минск : Изд-во БГУ, 1982. — 302 с.
13. Подьяконов, М. М. Методика рационального планирования эксперимента / М. М. Подьяконов, Р. И. Тедерер. — М. : Наука, 1978. — 78 с.
14. Маслов, Г. Г. Моделирование в агроинженерии методами планирования эксперимента / Г. Г. Маслов, Е. И. Трубилин, В. В. Цыбулевский. — Краснодар, 2010. — 304 с. : ил.

Поступила в редакцию 02.04.2021.

УДК 621.89.097.2

**А. А. Пивоварчик<sup>1</sup>, А. К. Гавриленя<sup>2</sup>, О. Д. Заболотный<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»,  
Министерство образования Республики Беларусь, ул. Ожешко, 22, 230021 Гродно, Республика Беларусь,  
+375 (29) 876 68 24, Pivovarchik\_AA@grsu.by

<sup>2</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,  
Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи,  
Республика Беларусь, +375 (29) 22 259 33, AndrejGavriljenja@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКИХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Целью настоящей работы является исследование изменения эксплуатационных показателей (кинематической вязкости при 40 и 100 °С, температуры вспышки в открытом тигле) полусинтетических моторных масел марки SAE 10W40 при увеличении величины пробега механического транспортного средства.

Научная новизна работы состоит в получении новых экспериментальных данных по изменению кинематической вязкости и температуры вспышки в открытом тигле полусинтетических моторных масел марки SAE 10W40 производителей компаний Shell, Castrol и Eni при увеличении пробега транспортного средства.

Показаны результаты исследования кинематической вязкости и температуры вспышки в открытом тигле полусинтетических моторных масел марки SAE 10W40 от производителей компаний Shell, Castrol и Eni. В результате проведенных исследований установлено, что исследуемое моторное масло марки Castrol Magnatec 10W40 обладает более высокими эксплуатационными показателями в сравнении с другими исследуемыми марками моторных масел.

**Ключевые слова:** механические транспортные средства; моторное масло; кинематическая вязкость; температура вспышки в открытом тигле.

Рис. 3. Библиогр.: 13 назв.

**А. А. Pivovarchik<sup>1</sup>, А. К. Gavriljenja<sup>2</sup>, О. D. Zabolotny<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Yanka Kupala State University of Grodno, the Ministry of Education of the Republic of Belarus,  
22 Ozheshko Str., 230021 Grodno, the Republic of Belarus, +375 (29) 876 68 24, Pivovarchik\_AA@grsu.by

<sup>2</sup>Baranovichi State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str.,  
225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 222 59 33, AndrejGavriljenja@mail.ru

## STUDY OF VISCOSITY-TEMPERATURE INDICES OF SEMI-SYNTHETIC ENGINE OILS USED IN GASOLINE ENGINES OF POWER-DRIVEN VEHICLES

The purpose of this work is to study the change in performance indices (kinematic viscosity at 40 and 100 °C, flash point in an open crucible) of semi-synthetic engine oils SAE 10W40 with an increase in the mileage of a power-driven vehicle.

The scientific novelty of the work consists in obtaining new experimental data on the change in the kinematic viscosity and flash point in an open crucible of semi-synthetic engine oils of the SAE 10W40 brand produced by Shell, Castrol and Eni with an increase in vehicle mileage.

The results of a study of the kinematic viscosity and flash point in an open crucible of semi-synthetic engine oils SAE 10W40 from the manufacturers of Shell, Castrol and Eni are shown. As a result of the studies, it was found that the tested Castrol Magnatec 10W40 engine oil has higher performance in comparison with other tested brands of engine oils.

**Key words:** power-driven vehicles; engine oil; kinematic viscosity; flash point in an open crucible.

Fig. 3. Ref.: 13 titles.

**Введение.** Двигатель внутреннего сгорания (далее — ДВС) является основным потребителем моторных масел. В настоящее время в мире более 177 компаний занимаются производством моторных масел. Отечественными и зарубежными производителями на мировом рынке выпускается более 3 400 различных марок моторных масел.

Моторные масла представляют собой сложные по химическому составу эксплуатационные материалы, которые в значительной мере определяют работу ДВС. Использование моторных масел при эксплуатации механических транспортных средств, оборудованных бензиновым двигателем, является неотъемлемой частью работы узлов и механизмов ДВС и определяет надежность, долговечность и работоспособность двигателя. Корректно подобранное моторное масло позволяет увеличить ресурс работы двигателя в среднем до 40 % и снизить расход топлива на 5...15 %. В свою очередь, знание эксплуатационных свойств моторных масел — необходимое условие для специалиста, работающего в сфере эксплуатации и обслуживания транспортных механических средств [1—10].

Кинематическая вязкость является одним из наиболее важных эксплуатационных показателей моторного масла. Именно от кинематической вязкости в значительной степени зависят надежность поступления масла в зазоры основных узлов трения двигателя, создание достаточно прочной масляной пленки при трении, легкость пуска двигателя при низких температурах, механические потери, расход топлива, интенсивность изнашивания и т. д. [1—9].

Кинематическая вязкость представляет собой отношение динамической вязкости к плотности моторного масла при той же температуре. Кинематическая вязкость не влияет на состояние масла, однако характеризует внутреннее трение состава или его сопротивление собственному течению, а также позволяет оценить показатели текучести моторного масла при рабочих температурах 100 и 40 °С.

В работах [3; 6; 8; 11] отмечается, что моторные масла по вязкости при 100 °С классифицируются на маловязкие (4...6 мм<sup>2</sup>/с), средневязкие (3...4 мм<sup>2</sup>/с), а также вязкие (8...9 мм<sup>2</sup>/с и выше). Вязкость моторного масла определяет толщину масляной пленки, образующуюся на поверхностях трения в процессе работы ДВС, его прокачиваемость при низких температурах, а также надежность смазывания при высоких температурах. К тому же вязкость оказывает существенное влияние на потери на трение и расход топлива.

В ГОСТ 10541-78 «Масла моторные универсальные и для автомобильных карбюраторных двигателей. Технические условия» указано, что кинематическая вязкость универсальных моторных масел при 100 °С, используемых в бензиновых ДВС, должна находиться в пределах не менее чем от 5,6 до 6,5 сСт, а температура вспышки не должна быть ниже 190 °С.

Исследователи в работе [6; 8] считают, что кинематическая вязкость моторного масла для бензиновых двигателей при 100 °С должна находиться в пределах от 3 до 16 сСт, а при 40 °С — не ниже 140 сСт. По мнению исследователей, представленному в работе [11], для увеличения срока службы двигателя кинематическая вязкость моторного масла бензиновых двигателей при 100 °С должна находиться в пределах от 12,0 до 14,0 сСт.

Температура вспышки моторного масла представляет собой низшую температуру, при которой пары нагреваемого моторного масла при определенных условиях образуют смесь с воздухом, взрывающуюся при поднесении пламени (первая вспышка). При температуре вспышки моторное масло еще не воспламеняется. Температуру вспышки определяют при нагревании моторного масла в открытом или закрытом тигле. Данный показатель моторного масла свидетельствует о наличии в масле легкокипящих фракций, что определяет способность состава образовывать нагар и сгорать при соприкосновении с горячими деталями двигателя. У качественного и хорошего моторного масла значение температуры вспышки должно быть как можно выше. У современных моторных масел температура вспышки превышает значение 200 °С и, как правило, находится в пределах от 210 до 230 °С и выше. В работах [3; 6; 8; 11; 12] указывается, что температура вспышки в открытом тигле для моторного масла, используемого в бензиновых ДВС, должна быть не ниже 165 °С.

Для определения сроков службы моторного масла в двигателях многие авторы рекомендуют использовать так называемые «браковочные показатели», при достижении которых моторное масло следует заменить [10—12]. Браковочные показатели для значения кинематической вязкости соответствуют следующим значениям: в сторону увеличения значения кинематической вязкости на 25 % и уменьшения первоначального значения более чем на 20 % [11—13].

Вследствие того, что условия эксплуатации механических транспортных средств могут быть различны, то по причине износа элементов ДВС, нарушения температурного режима работы и других факторов степень снижения эксплуатационных показателей моторных масел существенно возрастает и, как итог, установленные заводом-изготовителем требования по замене моторного масла могут не выполняться. Поэтому для уточнения фактических сроков замены моторного масла в целях увеличения срока службы двигателя представляют интерес исследования по определению возможной потери эксплуатационных показателей моторного масла: кинематической вязкости, измеренной при 40 и 100 °С и температуры вспышки в открытом тигле.

**Материалы и методы исследования.** Исследование прошли следующие марки полусинтетических моторных масел: Shell Helix HX7 10W40, Castrol Magnatec 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40. Выбор указанных марок моторных масел обусловлен тем, что при осуществлении пассажироперевозок данные моторные масла централизованно закупаются и используются в легковых автомобилях марки Volkswagen Polo Sedan. Согласно рекомендациям завода-изготовителя, замену данных моторных масел следует проводить после 15 тыс. км пробега.

В качестве подвижного состава принят легковой автомобиль марки Volkswagen Polo Sedan, оборудованный бензиновым ДВС (4 цилиндра) с распределенным впрыском топлива объемом 1 598 см<sup>3</sup>.

В целях получения достоверных результатов исследования выбранные марки моторных масел последовательно заливались в каждый из трех автомобилей. За результат исследования принималось среднее значение исследуемого показателя, полученное после отбора проб.

Перед проведением исследований проведена внеплановая замена моторного масла, при этом пробег всех транспортных средств составлял значение от 60 до 65 тыс. км. Через каждые 5 тыс. км до 15 тыс. км пробега отбиралась проба моторного масла для выполнения исследования по определению эксплуатационных показателей масла.

Следует также отметить, что после проведения экспериментов по исследованию эксплуатационных показателей моторного масла образец масла обратно заливался в двигатель транспортного средства. Доливание моторного масла в двигатель не проводилось вследствие того, что перед проведением исследований масло заливалось до максимального уровня по щупу, что, в свою очередь, позволило получать более корректные экспериментальные данные. Перед отбором пробы образца проводился контроль уровня моторного масла в двигателе.

Выбранные в качестве объекта исследования моторные масла исследовали по следующим эксплуатационным показателям: кинематической вязкости, измеренной при 40 и 100 °С, температуре вспышки в открытом тигле.

Исследование кинематической вязкости образцов моторного масла проводилось согласно ГОСТ 33-2000 «Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости». Температуру вспышки определяли по ГОСТ 4333-87 «Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле». Для определения вышеуказанных эксплуатационных показателей использовалось специализированное сертифицированное оборудование на базе УП «Белоруснефть-Гроднооблнефтепродукт».

**Результаты исследования и их обсуждение.** Полученные и представленные на рисунке 1 экспериментальные данные по изменению кинематической вязкости моторных масел, измеренной при температуре 40 °С, показывают, что исследуемый показатель с увеличением величины пробега транспортного средства до 15 тыс. км снижается у всех трех моторных масел марок Shell Helix HX7 10W40, Castrol Magnatec 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40.

Установлено, что снижение кинематической вязкости, измеренной при 40 °С и при пробеге транспортным средством 15 тыс. км, моторного масла марки Shell Helix HX7 10W40

составило 28,41 сСт, для моторных масел марок Castrol Magnatec 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 — 26,6 и 35,2 сСт соответственно. При пробеге транспортным средством 10 тыс. км кинематическая вязкость, измеренная при 40 °С, для моторного масла марки Shell Helix HX7 10W40 уменьшилась на 17,5 %, для моторных масел марок Castrol Magnatec 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 — на 16,5 и 19,5 % соответственно.

Как показано на рисунке 1, наиболее интенсивное снижение кинематической вязкости моторных масел при 40 °С происходит при пробеге транспортным средством более 10 тыс. км. Также можно отметить, что при пробеге транспортным средством 15 тыс. км кинематическая вязкость при 40 °С для моторного масла марки Shell Helix HX7 10W40 уменьшилась на 29,5 %, а для моторных масел марок Castrol Magnatec 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 — на 24,9 и 26,7 % соответственно.

На рисунке 2 представлены экспериментальные данные по изменению кинематической вязкости моторных масел, измеренной при температуре 100 °С.

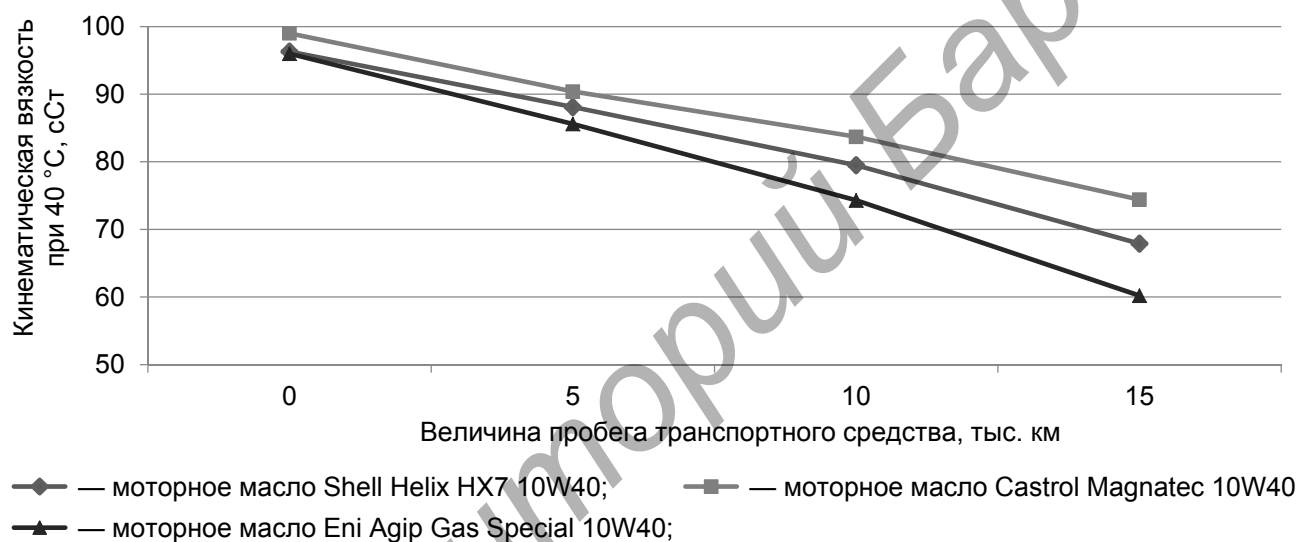


Рисунок 1. — Результаты исследования кинематической вязкости моторных масел при 40 °С

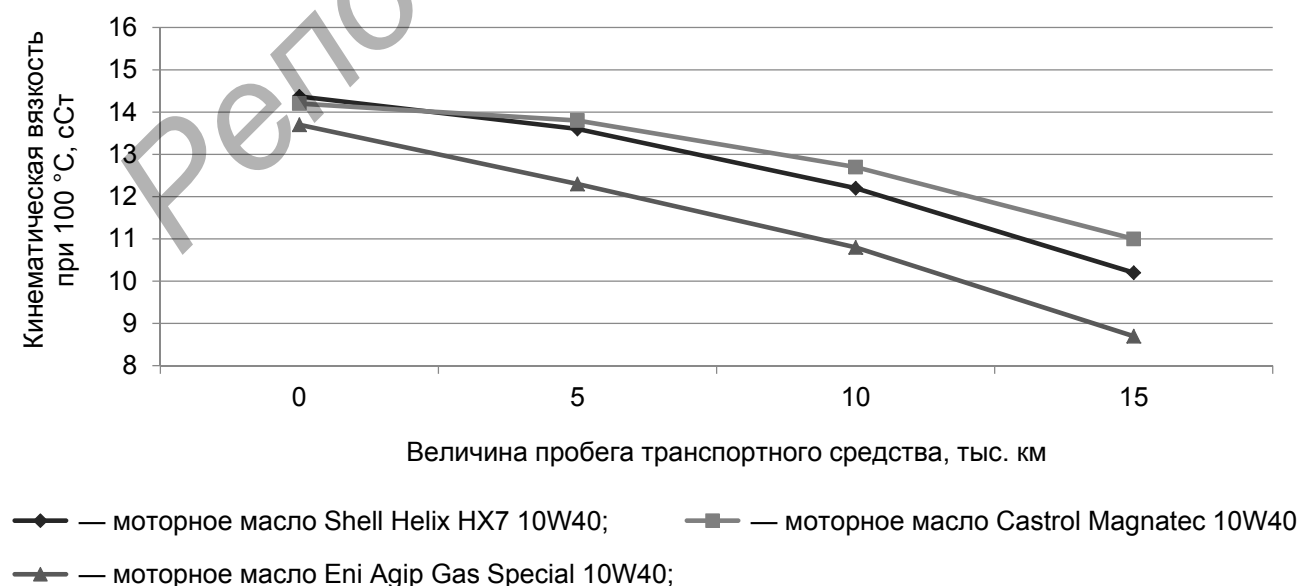


Рисунок 2. — Результаты исследования кинематической вязкости моторных масел при 100 °С

Результаты исследования изменения кинематической вязкости моторных масел, измеренной при температуре 100 °С, свидетельствуют о том, что при пробеге транспортным средством 15 тыс. км наибольшее изменение контролируемого эксплуатационного показателя наблюдается при использовании полусинтетического моторного масла марки Eni Agip Gas Special 10W40 (5 сСт). Лучший результат получен при использовании моторного масла марки Castrol Magnatec 10W40 (3,2 сСт). Промежуточный результат получен при использовании моторного масла марки Shell Helix HX7 10W40 (4,17 сСт). Однако следует отметить, что максимальное изменение величины кинематической вязкости, измеренной при 100 °С, наблюдается после 10 тыс. км пробега транспортным средством: для масла марки Shell Helix HX7 10W40 — 2,0 сСт, для моторных масел марок Castrol Magnatec 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 — 1,7 и 2,1 сСт соответственно.

Установлено, что при пробеге транспортным средством 15 тыс. км значение кинематической вязкости, измеренной при 100 °С, для моторного масла марки Shell Helix HX7 10W40 уменьшилось на 29,1 %, а для моторных масел марок Castrol Magnatec 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 — на 22,6 и 37,5 % соответственно. Так как кинематическая вязкость исследуемых моторных масел снизилась более чем на 20 %, то, согласно работам [11—13], моторные масла необходимо заменить раньше срока, указанного в нормативно-технической документации.

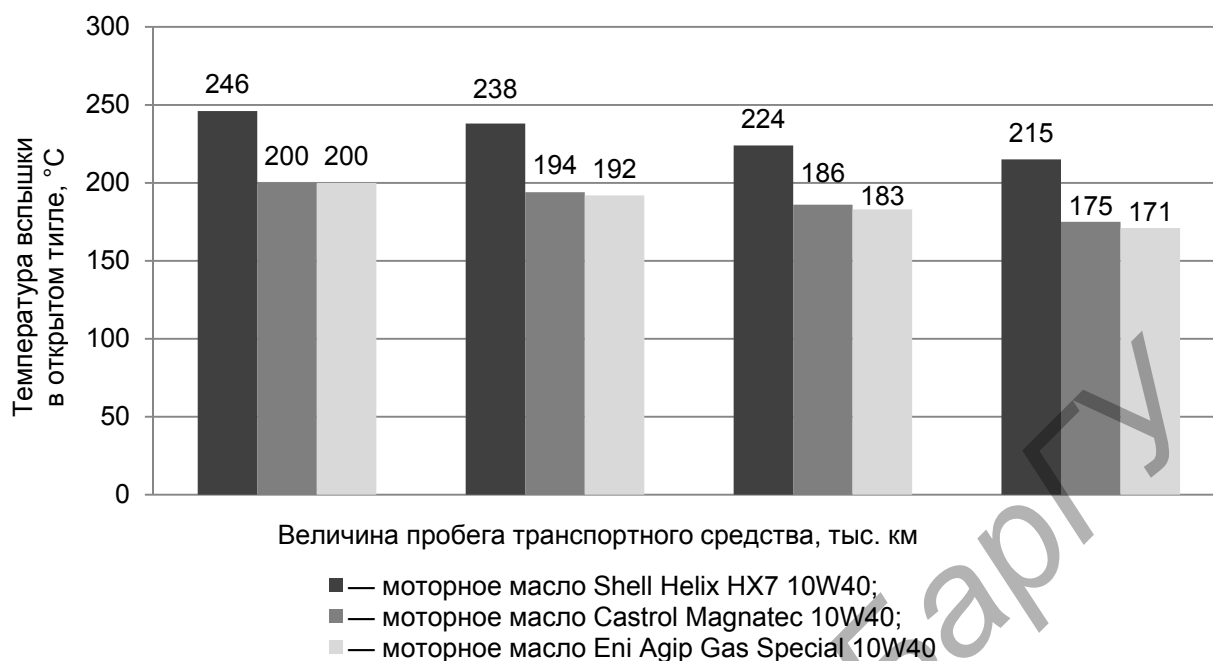
Однако, по мнению авторов работ [8; 11], замену моторного масла следует проводить при снижении кинематической вязкости на 30 % и более. Как видно из рисунка 2, изменение кинематической вязкости при 100 °С на величину, превышающую 30 %, наблюдается при использовании только моторного масла марки Eni Agip Gas Special 10W40.

Среди возможных причин снижения кинематической вязкости также следует отметить неполное сгорание топливно-воздушной смеси и утечку топлива из системы питания в моторное масло. В результате кинематическая вязкость масла может значительно снизиться. Кроме того, под воздействием легких фракций топлива моторное масло будет окисляться значительно быстрее, как следствие, образующиеся при этом органические кислоты и отложения значительно ухудшают его качество, снижая кинематическую вязкость. В результате повреждаются подшипники, на деталях ДВС интенсивно образуются нагар и лаковые отложения, что способствует увеличению количества механических примесей в моторном масле. О возможном наличии топлива в моторном масле также свидетельствует снижение температуры вспышки масла в открытом тигле до 175 °С и ниже [12; 13].

На рисунке 3 представлены результаты исследования изменения температуры вспышки полусинтетических моторных масел марок Shell Helix HX7 10W40, Castrol Magnatec 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40. Установлено, что температура вспышки в открытом тигле при исследовании образцов всех моторных масел с увеличением величины пробега транспортного средства снижается.

Наибольшее снижение температуры вспышки в открытом тигле при эксплуатации транспортного средства с использованием моторного масла марки Shell Helix HX7 10W40 наблюдается в период пробега от 5 до 10 тыс. км и в сравнении с исходным значением составляет 14 °С. При аналогичном пробеге при исследовании моторного масла марки Castrol Magnatec 10W40 данный показатель равен 8 °С, для моторного масла марки Eni Agip Gas Special 10W40 — 9 °С (см. рисунок 3). При дальнейшем увеличении пробега транспортного средства с 10 до 15 тыс. км наблюдается менее интенсивное снижение температуры вспышки в открытом тигле и для моторных масел марок Shell Helix HX7 10W40 и Castrol Magnatec 10W40 — 9 и 11 °С соответственно. Однако при использовании моторного масла марки Eni Agip Gas Special 10W40 температура вспышки в открытом тигле при пробеге от 10 до 15 тыс. км снизилась на 12 °С.

Установлено, что через каждые 5 тыс. км пробега транспортным средством температура вспышки в открытом тигле для моторного масла марки Shell Helix HX7 10W40 снижается в среднем на 10,1 °С, для моторного масла Castrol Magnatec 10W40 — на 7,3 °С, для моторного масла марки Eni Agip Gas Special 10W40 — на 9,3 °С.



**Рисунок 3. — Результаты исследований температуры вспышки в открытом тигле моторных масел**

Результаты исследований, представленные на рисунке 3, свидетельствуют о том, что температура вспышки в открытом тигле при использовании моторного масла марки Shell Helix HX7 10W40 снизилась на 12,7 %, моторного масла Castrol Magnatec 10W40 — на 12,5 %, моторного масла марки Eni Agip Gas Special 10W40 — на 14,5 %.

Снижение температуры вспышки в открытом тигле в исследуемых марках полусинтетических моторных масел обусловлено уменьшением в процессе эксплуатации транспортного средства числа фракций дистиллятных топлив (легких углеводородов), а также числа легких продуктов термического и термоокислительного разложения масла. Влияние на величину изменения температуры вспышки моторного масла в открытом тигле также оказывает химический состав основы моторного масла и количество присадок, основанных на воспламеняющихся компонентах.

**Заключение.** Результаты выполненных исследований показывают, что кинематическая вязкость, измеренная при 40 °C и при пробеге транспортным средством 15 тыс. км, полусинтетических моторных масел марок Shell Helix HX7 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 в сравнении с моторным маслом марки Castrol Magnatec 10W40 уменьшилась на 4,6 и 12,4 % соответственно.

Установлено, что кинематическая вязкость, измеренная при 100 °C и при пробеге транспортным средством 15 тыс. км, полусинтетических моторных масел марок Shell Helix HX7 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 в сравнении с моторным маслом марки Castrol Magnatec 10W40 уменьшилась на 6,5 и 13,9 % соответственно.

Экспериментально установлено, что температура вспышки в открытом тигле при пробеге транспортным средством 15 тыс. км моторных масел марок Shell Helix HX7 10W40 и Castrol Magnatec 10W40 снизилась на 1,8...1,9 % меньше, чем при использовании моторного масла марки Eni Agip Gas Special 10W40.

В результате проведенных исследований установлено, что моторное масло марки Castrol Magnatec 10W40 обладает более высокими эксплуатационными показателями по исследуемым показателям в сравнении с другими марками моторных масел.

## Список цитированных источников

1. *Васильева, Л. С.* Автомобильные эксплуатационные материалы : учебник / Л. С. Васильева. — М. : Наука-Пресс, 2003. — 421 с.
2. *Топливо, смазочные материалы и технические жидкости : учеб. пособие / В. В. Остриков [и др.].* — Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. — 304 с.
3. *Карташевич, А. Н.* Топливо, смазочные материалы и технические жидкости / А. Н. Карташевич, В. С. Товстыка, А. В. Гордеенко. — М. : Инфра-М, 2015. — 420 с.
4. *Геленов, А. А.* Автомобильные эксплуатационные материалы : учеб. пособие / А. А. Геленов, Т. И. Соченко, В. Г. Спиркин. — 4-е изд., стер. — М. : Академия, 2015. — С. 115—116.
5. *Долгова, Л. А.* Обеспечение рационального ресурса моторного масла в двигателях / Л. А. Долгова, В. В. Салмин // Вестн. Чуваш. гос. пед. ун-та им. И. Я. Яковлева. — 2012. — № 2 (74). — С. 146—156.
6. *Трембач, Е. В.* Моторные и трансмиссионные масла, присадки / Е. В. Трембач. — Ростов н/Д : Феникс, 2000. — С. 81—97.
7. *Пивоварчик, А. А.* Исследование эксплуатационных свойств полусинтетических моторных масел, используемых в дизельных двигателях внутреннего сгорания / А. А. Пивоварчик, А. К. Гавриленя, А. И. Сергей // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2020. — № 8. — С. 111—118.
8. *Трофименко, И. Л.* Автомобильные эксплуатационные материалы : учеб. пособие / И. Л. Трофименко, Н. А. Коваленко, В. П. Лобах. — Минск : Новое знание, 2008. — 232 с.
9. *Сырбаков, А. П.* Топливо и смазочные материалы : учеб. пособие / А. П. Сырбаков, М. А. Корчуганова ; Том. политехн. ун-т. — Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2015. — 159 с.
10. *Пивоварчик, А. А.* Исследование температурно-вязкостных показателей полусинтетических моторных масел, используемых в дизельных двигателях механических транспортных средств / А. А. Пивоварчик, А. И. Сергей // Вестн. Гродз. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 6 : Тэхніка. — 2019. — Т. 9, № 1. — С. 78—87.
11. *Трубилов, А. К.* Автомобильные эксплуатационные материалы : учеб. пособие / А. К. Трубилов, В. А. Хитрюк. — Минск : Респ. ин-т проф. образования, 2012. — С. 79—105.
12. *Дашивец, Г. И.* Обоснование периодичности замены моторных масел при эксплуатации тракторных двигателей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Г. И. Дашивец ; ЦНИИ механизации и электрификации сел. хоз-ва Нечернозем. зоны СССР. — Минск, 1990. — 15 с.
13. *Чудиновских, А. Л.* Разработка научных основ химмотологической оценки автомобильных моторных масел : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.07 / А. Л. Чудиновских ; Рос. гос. ун-т нефти и газа (Нац. исслед. ун-т) им. И. М. Губкина. — М., 2016. — 50 с.

Поступила в редакцию 05.03.2021.

УДК 621.89.097.2

**А. А. Пивоварчик<sup>1</sup>, А. К. Гавриленя<sup>2</sup>, О. Д. Заболотный<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»,  
Министерство образования Республики Беларусь, ул. Ожешко, 22, 230021 Гродно, Республика Беларусь,  
+375 (29) 876 68 24, Pivovarchik\_AA@grsu.by

<sup>2</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,  
Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи,  
Республика Беларусь, +375 (29) 22 259 33, AndrejGavrilena@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКИХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ МАРКИ SAE 10W40, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Целью настоящей работы является исследование изменения эксплуатационных показателей полусинтетических моторных масел в процессе эксплуатации механических транспортных средств для уточнения фактических сроков замены моторного масла.

Научная новизна работы состоит в получении новых экспериментальных данных по изменению плотности моторного масла при 15 °С, содержания механических примесей и воды в полусинтетических моторных маслах марок Shell Helix HX7 10W40, Castrol Magnatec 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 при изменении величины пробега транспортного средства.

Представлены результаты исследования эксплуатационных показателей марок моторных масел при эксплуатации транспортных средств. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что при 15 °С и при максимальном значении пробега (15 тыс. км) плотность моторного масла Eni Agip Gas Special 10W40 выше, чем плотность моторных масел марок Shell Helix HX7 10W40 и Castrol Magnatec 10W40, на 1,6 и 1,4 % соответственно. Замену моторного масла марки Castrol Magnatec 10W40 целесообразно проводить после 15 тыс. км пробега, моторных масел марок Shell Helix HX7 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 — после 10 тыс. км пробега из-за значительного содержания механических примесей.

**Ключевые слова:** бензиновый двигатель внутреннего сгорания; механические транспортные средства; моторное масло; плотность; механические примеси; содержание воды.

Рис. 2. Табл. 1. Библиогр.: 13 назв.

**A. A. Pivovarchik<sup>1</sup>, A. K. Gavrilena<sup>2</sup>, O. D. Zabolotny<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Yanka Kupala State University of Grodno, the Ministry of Education of the Republic of Belarus,  
22 Ozheshko Str., 230021 Grodno, the Republic of Belarus, +375 (29) 876 68 24, Pivovarchik\_AA@grsu.by

<sup>2</sup>Baranovichi State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str., 225404  
Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 222 59 33, AndrejGavrilena@mail.ru

## PERFORMANCE STUDY OF SEMI-SYNTHETIC SAE 10W40 ENGINE OILS USED IN GASOLINE ENGINES

The purpose of this work is to study the change in the performance of semi-synthetic engine oils during the operation of power-driven vehicles in order to clarify the actual timing of replacing the motor oil.

The scientific novelty of the work consists in obtaining new experimental data on the change in the engine oil density at 15 °С, the content of mechanical impurities and water in semi-synthetic engine oils of the Shell Helix HX7 10W40, Castrol Magnatec 10W40 and Eni Agip Gas Special 10W40 brands when changing the vehicle mileage.

The main part of the article presents the results of the study of the performance indices of engine oil brands during the operation of vehicles. As a result of experimental studies, it was found that at 15 °С and at the maximum value of the mileage (15 thousand km), the density of Eni Agip Gas Special 10W40 engine oil is higher than that of Shell Helix HX7 10W40 and Castrol Magnatec 10W40 engine oils by 1.6 and 1.4 %, respectively. It is advisable to replace

Castrol Magnatec 10W40 engine oil after 15 thousand kilometers, Shell Helix HX7 10W40 and Eni Agip Gas Special 10W40 engine oils — after 10 thousand kilometers due to the significant content of mechanical impurities.

**Key words:** gasoline internal combustion engine; power-driven vehicles; engine oil; density; mechanical impurities; water content.

Fig. 2. Table 1. Ref.: 13 titles.

**Введение.** Среди важнейших эксплуатационных показателей моторных масел выделяют плотность при 15 °С, содержание механических примесей и воды [1—10]. В настоящее время требования по увеличению работоспособности, надежности и эффективности работы транспортных средств привели к существенному ужесточению эксплуатационных показателей смазочных моторных масел [1; 2; 4]. Авторы научных работ [1—8] отмечают, что конструктивные особенности и условия эксплуатации механических транспортных средств должны соответствовать определенным по составу и свойствам топливу и смазочным материалам. Необоснованный и некорректный выбор марки моторного масла, а также несвоевременная замена моторного масла приводят к существенному сокращению срока службы и надежности работы транспортного средства (до 40 %), повышенному расходу топлива (от 5 до 15 %).

Имеющаяся информация в научной и технической литературе по срокам замены моторных масел в большинстве случаев носит рекомендательный характер. Результаты исследований, опубликованные в работах [1; 4; 6], показывают, что сроки замены полусинтетических моторных масел в бензиновых двигателях внутреннего сгорания (далее — ДВС) различны и варьируются в пределах от 15 до 20 тыс. км пробега, а также в значительной степени зависят от типа двигателя и его технического состояния, условий эксплуатации транспортного средства, количества присадок в моторном масле.

Вопросами замены моторных масел по их фактическому состоянию, а также поддержания работоспособности подвижного состава занимались такие исследователи, как С. В. Корнеев, А. Г. Варакин, И. И. Ширлин, А. М. Лопоткин и др. [1—9]. В научных работах [10—13] утверждается, что систематический контроль работоспособности моторных масел способствует существенной экономии финансовых средств, затрачиваемых на эксплуатацию механических транспортных средств, за счет увеличения срока эксплуатации транспортного средства.

В процессе организации пассажироперевозок транспортными предприятиями используются легковые автомобили различных моделей, в частности, Volkswagen Polo Sedan. В руководстве по эксплуатации и обслуживанию легкового транспортного средства марки Volkswagen Polo Sedan указано, что замену моторного масла следует проводить через один год эксплуатации транспортного средства или 15 тыс. км пробега при нормальных условиях эксплуатации. При тяжелых условиях эксплуатации замену масла рекомендуется проводить через 7,5 тыс. км пробега. В работах [1; 5; 9; 11—13] отмечается, что замена минерального масла производится после 10—15 тыс. км пробега, а синтетического моторного масла — после 20—35 тыс. км пробега.

Согласно нормативно-технической документации (ТКП 248-2010), замена моторного масла для легковых автомобилей проводится при выполнении технического обслуживания (далее — ТО) и технического ремонта, определяется с учетом поправочных коэффициентов, характеризующих условия работы подвижного состава и климатические условия. При этом рекомендуемый срок замены масла составляет 15 тыс. км без указания марки моторного масла.

В работах [1—9] установлено, что значение плотности моторных масел при 15 °С в процессе эксплуатации транспортных средств должно находиться в интервале от 830 до 880 кг / м<sup>3</sup>. Увеличение плотности свидетельствует о наличии в моторном масле механических примесей и (или) воды, что ведет к снижению срока службы ДВС. В свою очередь, к механическим примесям относятся все твердые вещества органического и неорганического

ского происхождения, находящиеся в моторном масле в виде осадка или во взвешенном состоянии, которые задерживаются фильтром при фильтровании самого нефтепродукта или его бензинового раствора.

Моторные масла в процессе хранения и работы засоряются твердыми примесями, попадающими извне, а также продуктами химического превращения самих масел, работающих при высокой температуре, и продуктами износа деталей. Механические примеси, находясь в масле, вызывают повышенный износ и нагрев поверхностей трения. Они способствуют образованию шлама, который скапливается в маслопроводах и нарушает подвод масла к узлам трения [7; 8]. Также известно, что оптимальное содержание механических примесей в моторном масле в процессе эксплуатации транспортного средства должно находиться в пределах от 0,015 до 0,03 %, а содержание воды не должно превышать значений от 0,03 до 0,05 % [10; 12]. При содержании воды выше допустимых значений рекомендуется заменить масло в ближайшее время.

**Материалы и методы исследования.** Исследование прошли полусинтетические моторные масла марок Shell Helix HX7 10W40, Castrol Magnatec 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40, используемые в бензиновых ДВС механических транспортных средств. Проведение исследований по определению плотности (ГОСТ 3900-85), содержания механических примесей (ГОСТ 6370-83) и воды (ГОСТ 2477-2017) выполняли в соответствии с требованиями указанных нормативных правовых актов. Выбор вышеуказанных марок моторных масел обусловлен тем, что при осуществлении пассажироперевозок данные моторные масла централизованно закупаются и используются в легковых автомобилях марки Volkswagen Polo Sedan. Завод-изготовитель транспортного средства рекомендует осуществить замену данных моторных масел после 15 тыс. км пробега.

В качестве подвижного состава принят легковой автомобиль марки Volkswagen Polo Sedan, оборудованный бензиновым двигателем (4 цилиндра) с распределенным впрыском топлива объемом 1 598 см<sup>3</sup>.

В целях получения достоверных результатов исследования все марки моторных масел заливались в каждый из трех автомобилей. За результат исследования принимали среднее арифметическое значение исследуемого показателя, полученное после отбора проб.

Перед проведением исследований проводилось ТО-2 легковых автомобилей, а также их диагностика. Установлено, что двигатели в легковых автомобилях полностью исправны. Также проверено натяжение цепи газораспределительного механизма, отрегулированы тепловые зазоры, исправность стартера, генератора, приборов системы зажигания и питания. На момент начала проведения исследования величина пробега всех механических транспортных средств находилась в диапазоне значений от 60 до 65 тыс. км. Объем залитого масла в ДВС автомобиля составил 3,7 л. Через каждые 5 тыс. км до 15 тыс. км пробега отбиралась проба моторного масла. Для определения содержания воды и механических примесей проба моторного масла отбиралась через каждые 3 тыс. км пробега. После проведения экспериментов по исследованию эксплуатационных показателей моторного масла образец масла обратно заливался в двигатель транспортного средства.

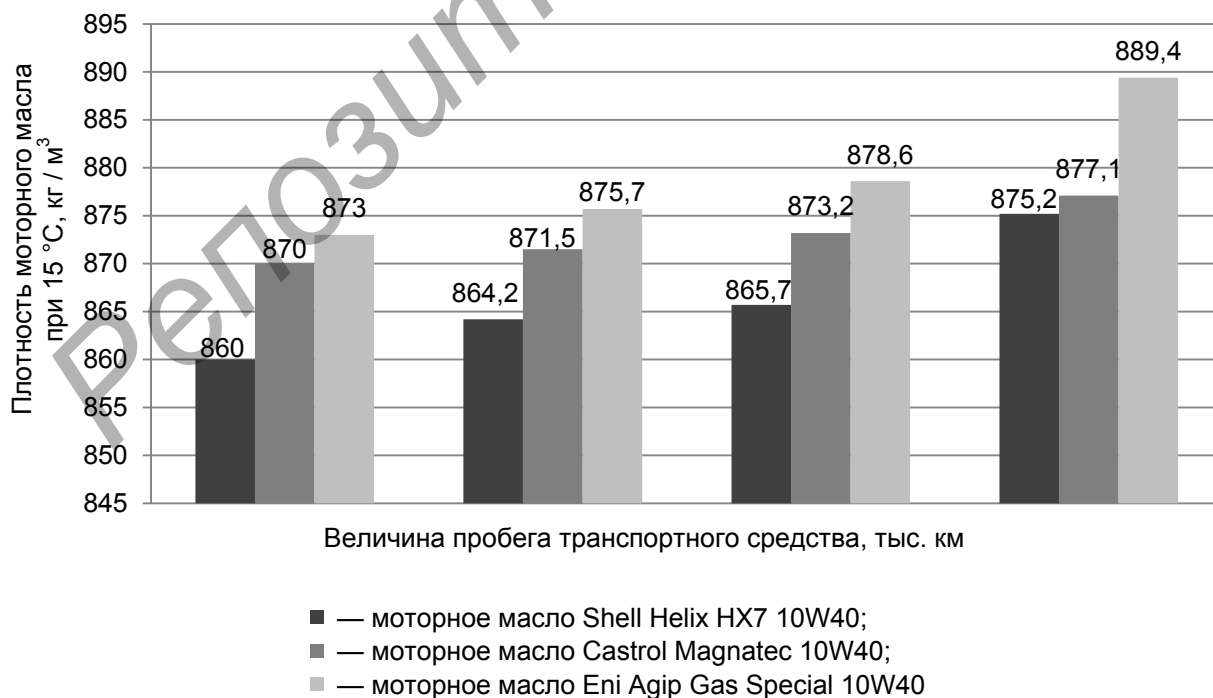
Доливание моторного масла в двигатель не проводилось ввиду того, что перед проведением исследований масло пополнялось до максимального уровня по щупу, что позволило получить более достоверные экспериментальные данные. Перед отбором пробы исследуемого образца и продолжением исследований осуществлялся контроль уровня моторного масла в двигателе. Определение плотности моторного масла при 15 °С, содержания механических примесей и воды проводили по стандартным методикам с использованием специализированного сертифицированного оборудования на базе УП «Белоруснефть-Гроднооблнефтепродукт».

**Результаты исследования и их обсуждение.** На рисунке 1 показано изменение плотности исследуемых моторных масел при 15 °С в зависимости от величины пробега транспортного средства. Установлено, что плотность всех исследуемых моторных масел при увеличении величины пробега возрастает.

Таким образом, результаты исследований показывают, что значение плотности, измеренной при 15 °С, моторного масла Shell Helix HX7 10W40 повышается на 15,2 кг / м<sup>3</sup>, моторных масел Castrol Magnatec 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 — на 7,1 и 16,4 кг / м<sup>3</sup> соответственно.

По результатам исследования можно утверждать, что в сравнении с моторными маслами марок Shell Helix HX7 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 наилучшими эксплуатационными свойствами, оцениваемыми по плотности моторного масла, ввиду менее интенсивного изменения данного показателя обладает полусинтетическое моторное масло марки Castrol Magnatec 10W40. Полученный результат связан с тем, что в составе данного полусинтетического масла в качестве добавки используют большее число синтетических добавок (до 40 % от основы). Кроме того, более высокие значения плотности моторных масел марок Shell Helix HX7 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 связаны с проведением исследования в осенне-зимний период эксплуатации транспортных средств. Известно, что при достаточно сильном охлаждении ДВС (например, в зимний период) возможна конденсация влаги [1; 4; 6]. Это приводит к увеличению количества воды в исследуемых образцах масла и, как следствие, повышению плотности моторного масла.

Кроме того, к повышению плотности моторного масла также могли привести отложения, нагары и осадки, образующиеся в процессе эксплуатации транспортного средства. Отложения образуются в результате превращения углеводородов, которые являются основой моторных масел.

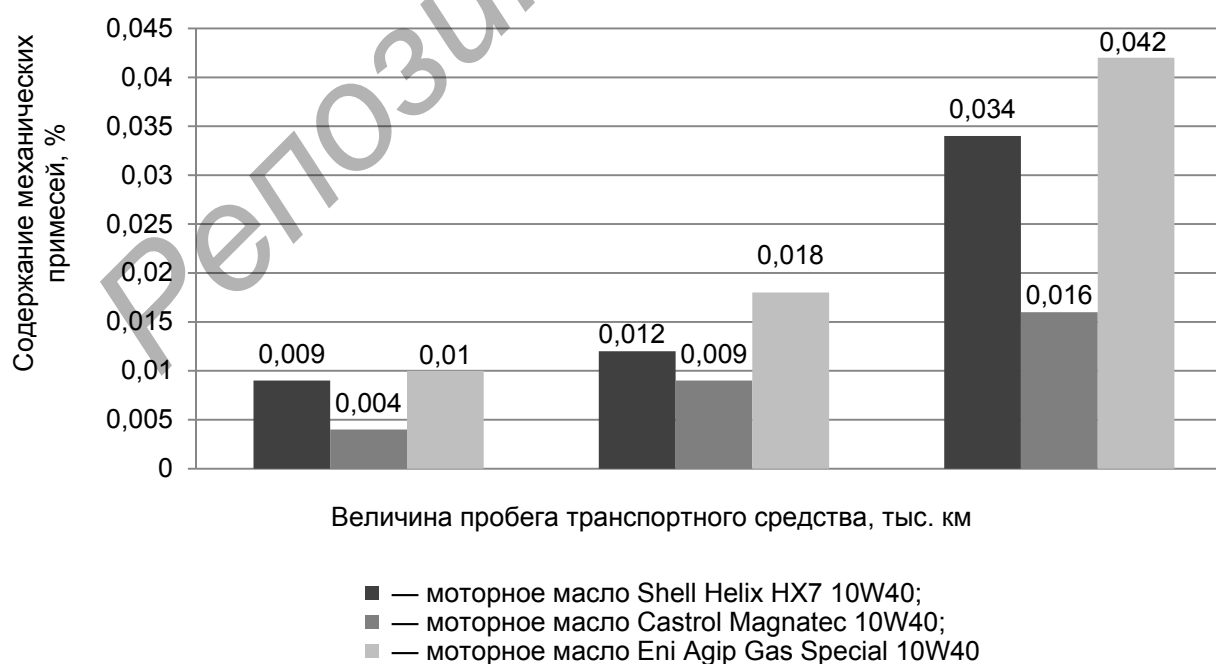


**Рисунок 1. — Результаты исследования изменения плотности исследуемых моторных масел при 15 °С**

Нагары представляют собой твердые углеродистые вещества, откладывающиеся на стенках камеры сгорания, клапанах, свечах, днище поршня и на верхнем пояске боковой поверхности поршня. Химический состав нагара зависит как от качества масла и топлива, так и от режима работы двигателя, запыленности воздуха, наличия присадок и др. [1; 6; 7—13]. Основную часть нагара составляют карбены и карбоиды (50,0...70,0 %), смолы и масла (15,0...40,0 %), асфальтены и оксикислоты (3,0...6,0 %) и зола (1,0...10,0 %). Количество образующегося нагара зависит от качества масла и его расхода, а также от качества применяемого топлива. Толщина слоя нагара зависит от теплового режима работы двигателя: чем ниже температура стенок камеры сгорания, тем больший слой нагара на них образуется. В летний период эксплуатации транспортного средства нагар образуется меньше, чем в зимний [1; 7—13]. Осадки откладываются на стенках поддона картера, крышке головки блока цилиндров, шейках коленчатого вала и других деталях ДВС, а также в фильтрах и маслопроводах. Осадки состоят из масла (50,0...85,0 %), воды (5,0...35,0 %) и продуктов их окисления: оксикислот (2,0...15,0 %), карбенов и карбоидов (2,0...10,0 %), асфальтенов (0,1...15,0 %) [4; 6—8; 10].

Экспериментально установлено, что наиболее интенсивное изменение значения плотности, измеренной при 15 °С, отмечено при пробеге транспортным средством более 10 тыс. км, что объяснимо практически полной потерей моторным маслом своих эксплуатационных показателей вследствие вышеназванных причин и так называемого «естественного старения», вызванного воздействием высоких температур и давлений в рабочей зоне ДВС при эксплуатации механического транспортного средства.

Содержание механических примесей в исследуемых образцах полусинтетических моторных масел марок Castrol Magnatec 10W40, Shell Helix HX7 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 при увеличении пробега транспортного средства возрастает у всех моторных масел (рисунок 2). При пробеге автомобиля до 10 тыс. км в исследуемых моторных маслах содержание механических примесей не превышает допустимой величины, равной 0,03 % [3—9]. Следует отметить, что в работах [12; 13] к содержанию механических примесей в моторных маслах предъявляются более жесткие требования (от 0,015 до 0,02 %).



**Рисунок 2. — Результаты исследований по определению содержания механических примесей в исследуемых образцах моторных масел**

Наименьшее содержание примесей получено при использовании полусинтетического моторного масла марки Castrol Magnatec 10W40 (см. рисунок 2). При пробеге транспортным средством 15 тыс. км содержание механических примесей увеличилось до 0,016 %, что свидетельствует о высоком качестве данного моторного масла. Наибольшее количество механических примесей наблюдается при использовании моторного масла марки Eni Agip Gas Special 10W40 (0,042 %), что в 2,6 раза выше, чем при использовании моторного масла марки Castrol Magnatec 10W40. Промежуточный результат получен при исследовании моторного масла марки Shell Helix HX7 10W40, однако окончательное содержание механических примесей в данном моторном масле после 15 тыс. км пробега в 2,1 раза выше, чем в моторном масле марки Castrol Magnatec 10W40.

Установлено, что превышение нормативного значения содержания механических примесей наблюдается для моторных масел марок Shell Helix HX7 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 при пробеге транспортным средством более 10 тыс. км. При величине пробега 15 тыс. км содержание механических примесей в данных моторных маслах превышает максимально допустимое значение на 0,004 и 0,012 п. п. соответственно.

Увеличение содержания механических примесей в исследуемых марках моторных масел обусловлено механическим износом элементов цилиндропоршневой группы двигателя вследствие увеличения коэффициента трения и потери технологических свойств противоударных присадок, входящих в состав исследуемых образцов полусинтетических моторных масел [9—13].

В таблице 1 представлены результаты исследования моторных масел по определению объемной доли воды при эксплуатации легкового транспортного средства.

Установлено, что следы воды присутствуют во всех исследуемых образцах моторных масел. При этом лучший результат наблюдается при использовании моторного масла марки Shell Helix HX7 10W40, так как вода появилась в масле после 9 тыс. км пробега (см. таблицу 1). В то же время в моторных маслах марок Castrol Magnatec 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 вода появляется после 6 тыс. км пробега. Дальнейшие исследования показывают, что наибольшее увеличение объемной доли воды наблюдается при пробеге транспортным средством более 12 тыс. км. Определено, что после 15 тыс. км пробега объемная доля воды в моторном масле марки Shell Helix HX7 10W40 составляет большее значение (0,019 %) в сравнении с другими марками исследуемых моторных масел. Причиной появления воды в моторных маслах исследуемых марок также может быть попадание топлива в масло и негерметичность охлаждающей системы ДВС [5; 9—13].

Т а б л и ц а 1. — Результаты определения объемной доли воды в исследуемых марках полусинтетических моторных масел

Пробег транспортного средства, тыс. км	Объемная доля воды в исследуемом моторном масле, %		
	Shell Helix HX7 10W40	Castrol Magnatec 10W40	Eni Agip Gas Special 10W40
Исходное значение	Следы	Следы	Следы
3	Следы	Следы	Следы
6	Следы	Следы	Следы
9	Следы	0,002	0,001
12	0,006	0,007	0,006
15	0,019	0,014	0,017

По результатам исследования можно утверждать, что лучшими эксплуатационными свойствами, оцениваемыми по объемной доле воды в масле, в сравнении с моторными маслами марок Shell Helix HX7 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 обладает полусинтетическое моторное масло марки Castrol Magnatec 10W40. Все полученные значения объемной доли воды в образцах моторного масла находятся в допустимом диапазоне, который для моторного масла, используемого в бензиновых ДВС, составляет от 0,03 до 0,05 % [6—13].

Следует также отметить, что в первоначальный период эксплуатации транспортного средства (до 12 тыс. км пробега) лучший показатель по объемной доле воды наблюдался у моторного масла марки Shell Helix HX7 10W40. Полученный результат связан с тем, что в составе данного полусинтетического масла присутствует большее число присадок и добавок, отвечающих за возможное появление воды в составе моторного масла. Однако при дальнейшем увеличении пробега транспортного средства объемная доля воды в данном моторном масле превысила аналогичный показатель при исследовании других марок моторных масел, что обусловлено потерей присадками своего функционального назначения.

**Заключение.** В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что при максимальном значении пробега (15 тыс. км) плотность при 15 °С масла марки Eni Agip Gas Special 10W40 выше, чем плотность моторных масел марок Shell Helix HX7 10W40 и Castrol Magnatec 10W40, на 1,6 и 1,4 % соответственно.

Показано, что содержание механических примесей при пробеге 10 тыс. км у исследуемых марок масел находится в допустимых пределах. При пробеге 15 тыс. км допустимое содержание механических примесей отмечено только в моторном масле марки Castrol Magnatec 10W40.

Проведенные эксперименты показывают, что содержание объемной доли воды в исследуемых пробах полусинтетических моторных масел марок Shell Helix HX7 10W40, Castrol Magnatec 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 при пробеге транспортным средством 15 тыс. км не превышают максимально допустимое значение 0,03 %, установленное нормативно-технической документацией.

Таким образом, выполненные исследования показали, что полусинтетическое моторное масло марки Castrol Magnatec 10W40 обладает более высокими эксплуатационными свойствами по исследуемым показателям в сравнении с моторными маслами марок Shell Helix HX7 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40. Замену моторного масла марки Castrol Magnatec 10W40 целесообразно проводить после 15 тыс. км пробега, моторных масел марок Shell Helix HX7 10W40 и Eni Agip Gas Special 10W40 — после 10 тыс. км пробега из-за значительного содержания механических примесей.

#### Список цитированных источников

1. Корнеев, С. В. О работоспособности моторных масел / С. В. Корнеев // Двигателестроение. — 2004. — № 4. — С. 36—38.
2. Liehpao, O. F. AshlessAntiwear and Extreme-Pressure Additives / O. F. Liehpao // Lubricant additives: chemistry and applications / ed. L. R. Rudnick. — New York, 2009. — P. 3, ch. 8. — P. 214—257.
3. Исследования характеристик моторных масел 5w40 и 10w40 / Е. Б. Ахметбай [др.] // Эпоха науки. Технические науки. — 2018. — № 16. — С. 159—163.
4. Варакин, А. Г. Сравнительный тест полусинтетических моторных масел / А. Г. Варакин, А. М. Лопоткин, А. Е. Хохлов // Вестн. Нижегород. гос. инженер.-экон. ун-та. — 2014. — № 10 (41). — С. 17—22.
5. Пивоварчик, А. А. Исследование эксплуатационных свойств полусинтетических моторных масел, используемых в дизельных двигателях внутреннего сгорания / А. А. Пивоварчик, А. К. Гавриленя, А. И. Сергей // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2020. — № 8. — С. 111—118.
6. Долгова, Л. А. Обеспечение рационального ресурса моторного масла в двигателях / Л. А. Долгова, В. В. Салмин // Вестн. Чуваш. гос. пед. ун-та им. И. Я. Яковлева. — 2012. — № 2 (74). — С. 146—156.
7. Корнеев, С. В. Изменение характеристик моторных масел в газопоршневых двигателях большой мощности / С. В. Корнеев // Вестн. Сиб. гос. автомобил.-дорож. акад. — 2017. — Вып. 4—5 (56—57). — С. 37—41.

8. *Корнеев, С. В.* Оценка достоверности прогнозирования периодичности смены моторного масла в двигателях / С. В. Корнеев, А. П. Серков // Ом. науч. вестн. — 2014. — № 1. — С. 62—65.
9. *Пивоварчик, А. А.* Исследование температурно-вязкостных показателей полусинтетических моторных масел, используемых в дизельных двигателях механических транспортных средств / А. А. Пивоварчик, А. И. Сергей // Весн. Гродз. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 6 : Тэхніка. — 2019. — Т. 9, № 1. — С. 78—87.
10. Влияние условий эксплуатации автомобилей на ресурс работы моторного масла / И. И. Ширлин [и др.] // Вестн. Сиб. гос. автомобил.-дорож. акад. — 2013. — Вып. 4 (32). — С. 42—45.
11. *Доблер, В. И.* Повышение эксплуатационной надежности двигателей дорожных и строительных машин трибологическим контролем состояния и активацией моторных масел : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / В. И. Доблер ; Том. политехн. ун-т. — Томск, 2005. — 23 с.
12. *Дашивец, Г. И.* Обоснование периодичности замены моторных масел при эксплуатации тракторных двигателей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Г. И. Дашивец ; ЦНИИ механизации и электрификации сел. хоз-ва Нечернозем. зоны СССР. — Минск, 1990. — 15 с.
13. *Чудиновских, А. Л.* Разработка научных основ химмотологической оценки автомобильных моторных масел : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.07 / А. Л. Чудиновских ; Рос. гос. ун-т нефти и газа (Нац. исслед. ун-т) им. И. М. Губкина. — М., 2016. — 50 с.

Поступила в редакцию 05.03.2021.

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Научная концепция журнала предполагает публикацию современных достижений в области технических наук; представление результатов фундаментальных и прикладных исследований, а также результатов, полученных в производственных условиях областей, включая результаты национальных и международных исследований. Статьи аспирантов, докторантов и соискателей последнего года обучения публикуются вне очереди при условии их полного соответствия требованиям, предъявляемым к научным публикациям.*

*Публикация статей в журнале бесплатная на основании заключённого договора о передаче исключительных прав на объект авторского права (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).*

*Статьи принимаются на русском, белорусском и английском языках посредством заполненной формы по Интернету (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).*

*Подробные правила для авторов представлены на официальном сайте БарГУ (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).*

## INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

*The scientific strategy of the journal suggests publishing modern achievements in the fields of Engineering sciences; presentation of the results of fundamental and applied research, as well as the results obtained under production conditions, both at the domestic and international level. Articles by postgraduate and doctoral students in their final year of traineeship are published out of turn if they are written in strict conformity with the specified requirements.*

*Publication of articles is free of charge in accordance with the existing contract on transfer of authority to the subject matter of copyright (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).*

*Articles can be written in the Russian, Belarusian or English languages and should be sent by the Internet (see the form to fill in: URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).*

*More detailed instructions for authors can be found on the official website of BarSU (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).*

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Репозиторий БарГУ