

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 1 (13), май, 2023

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: vestnikbargu@gmail.com .

Подписные индексы: 00999 — для индивидуальных
подписчиков; 009992 — для организаций.
Свидетельство о регистрации средств массовой
информации № 1533 от 30.07.2012, выданное
Министерством информации Республики Беларусь.

В соответствии с приказом Высшей
аттестационной комиссии Республики
Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-
практический журнал «Вестник БарГУ» серия
«Технические науки» включён в Перечень
научных изданий Республики Беларусь для
опубликования результатов диссертационных
исследований по техническим наукам.

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

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

Заведующий редакционно-издательской
группой А. Ю. Сидоренко
Технический редактор Л. Н. Щербук
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак
Корректоры: Н. Н. Колодко, Л. Н. Щербук

Подписано в печать 02.05.2023. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага ксероксная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 8,80. Уч.-изд. л. 6,40.
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, заслуженный работник образования
Республики Беларусь, профессор кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного
производства и агрономии (учреждение образования «Барановичский государственный
университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Климук В. В. (зам. гл. ред. журн.), кандидат экономических наук, доцент, первый
проректор (учреждение 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 (государственное научное
учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»,
Минск, Республика Беларусь; учреждение образования «Барановичский государственный
университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Горбач Ю. Е. (отв. секретарь сер.) (учреждение образования «Барановичский
государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Зубрицкая Л. С. (ред. текстов на англ. яз.) (учреждение образования «Барановичский
государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

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

Анискович Г. И., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Белорусский
государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь);

Белый А. В., академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук,
профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Девойно О. Г.**,
доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной
лабораторией плазменных и лазерных технологий (филиал Белорусского национального
технического университета «Научно-исследовательская часть», Минск, Республика Беларусь);

Дремук В. А., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский
государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Жигалов А. Н.**,
доктор технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный
университет», Барановичи, Республика Беларусь; государственное научное учреждение
«Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси», Могилев,
Республика Беларусь); **Калугин Ю. К.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение
образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно,
Республика Беларусь); **Карташевич А. Н.**, доктор технических наук, профессор (учреждение
образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового
Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь);

Клочков А. В., доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская
государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени
сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь); **Клубович В. В.**, академик
Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное
научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»,
Минск, Республика Беларусь); **Сиваченко Л. А.**, доктор технических наук, профессор
(межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-
Российский университет», Могилев, Республика Беларусь); **Томило В. А.**, доктор технических
наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика
Беларусь); **Шелег В. К.**, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор
технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск,
Республика Беларусь).

Promoter: Institution of Education "Baranavichy State University".

Editorial address:

21 Voykova Str., 225404 Baranavichy.
Phone: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Subscription indices: 00999 — for individual subscribers;
009992 — 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.

Managing editor A. Y. Sidorenko
Technical editor L. N. Scherbuk
Desktop Publishing S. M. Glushak
Proofreaders: N. N. Kolodko, L. N. Scherbuk

Signed print 02.05.2023. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 8,80.
Acc.-pub. s. l. 6,40. 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 Str., 231800 Slonim,
Grodno region.

EDITORIAL BOARD

Kochurko V. I. (*editor-in-chief*), DSc in Agriculture, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus, Professor of Department of Technical Support of Agricultural Production Processes and Agronomic Sciences (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Klimuk V. V. (*deputy editor-in-chief*), PhD in Economics, Associate Professor, first vice-rector (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Alifanov A. V. (*the series editor-in-chief*), Laureate of the State Prize of the Republic of Belarus in the field of science and technology, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus; Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Gorbach Yu. E. (*responsible for the topic area "Engineering Sciences"*) (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Zubritskaya L. S. (*ed. of texts in English*) (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Bogdanovich I. A. (*responsible for the area "Mechanical Engineering and Machine Science"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus); **Duben I. V.** (*responsible for the area "Processes and Machines of Agro engineering Systems"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Aniskovich G. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Belarusian State Agrarian Technical University", Minsk, the Republic of Belarus); **Bely A. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Devoino O. G.**, DSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Innovative Research Laboratory of Plasma and Laser Technologies (branch of the Belarusian National Technical University "Research Unit", Minsk, the Republic of Belarus); **Dremuk V. A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus); **Zhigalov A. N.**, DSc in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus; State scientific institution "Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Mogilev, the Republic of Belarus); **Kalugin Yu. K.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Yanka Kupala Grodno State University", Grodno, the Republic of Belarus); **Kartashevich A. N.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klochkov A. V.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klubovich V. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Sivachenko L. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", Mogilev, the Republic of Belarus); **Tomilo V. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus); **Sheleg V. K.**, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus).

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Алифанов А. В., Ционенко Д. А., Малеронок В. В., Милюкова А. М., Богданович И. А. Аналитические исследования комплексной термической и магнитно-импульсной упрочняющей обработки стальных изделий

Жигалов А. Н., Горавский И. А., Сотник Л. Л. Интенсивность ударной нагрузки и силового воздействия при резании концевым фрезерным инструментом

Качанов И. В., Хвилько К. В., Шаталов И. М., Щербакова М. К., Максимович А. В., Калиновский И. В. Компьютерное моделирование и лабораторные гидравлические исследования поворотного участка пульпопровода землесосного снаряда

Плетенев И. В. Оценка эффективности теплоотвода медных элементов технологического оборудования с диффузионным защитным слоем

Сиваченко Л. А., Сотник Л. Л., Кузьменкова М. С. К формированию технической базы адаптивных механизмов переработки дисперсных материалов

Юницкий А. Э., Гаранин В. Н., Кулай А. В. Исследование влияния эргономических факторов на геометрические параметры элементов интерьера на примере рукоятки салона Unibus U4-365

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Бондарев С. Н., Китун А. В. Анализ результатов исследований по совершенствованию доильных аппаратов

Клыбик В. К., Ракевич Ю. А. К вопросу рационального выбора распылительного устройства для эффективной промывки молокоохладителей

Швед И. М. Исследование технологических параметров процесса перемешивания жидкого навоза миксером с коническим кожухом

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

- 4 **Alifanov A. V., Tsionenko D. A., Maleronok V. V., Milyukova A. M., Bogdanovich I. A.** Analytical studies of complex thermal and magnetic pulse strengthening treatment of steel products
- 14 **Jigalov A. N., Goravskii I. A., Sotnik L. L.** Intensity of impact load and force impact when cutting by the end-milling tool
- 23 **Kachanov I. V., Khvitsko K. V., Shatalov I. M., Scharbakova M. K., Maksimovitsch A. V., Kalinovskiy I. V.** Computer modeling and laboratory hydraulic investigations of the drigger slurry pipe turning section
- 31 **Pletenev I. V.** Estimation of copper elements heat removal efficiency of technological equipment with a diffusion protective layer
- 39 **Sivachenko L. A., Sotnik L. L., Kuzmenkova M. S.** To the formation of the adaptive mechanisms technical base for dispersed materials processing
- 46 **Unitsky A. E., Garanin V. N., Kulai A. V.** Study of ergonomic factors influence on geometric parameters of interior elements on the example of Unibus U4-365 cabin handle

PROCESSES AND MACHINES
OF AGROENGINEERING SYSTEMS

- 57 **Bondarev S. N., Kitun A. V.** Analysis of research results on the improvement of milking machines
- 64 **Klybik V. C., Rakevich Y. A.** To the question of the rational choice of a spray device for milk coolers effective washing
- 69 **Shved I. M.** Research of technological parameters of the mixing liquid manure process with a mixer with a conical casing

УДК 004.94; 621.373

А. В. Алифанов^{1,2}, доктор технических наук, профессор,
Д. А. Ционенко³, кандидат физико-математических наук, доцент,
В. В. Малеронок⁴, А. М. Милюкова¹, кандидат технических наук, доцент,
И. А. Богданович², кандидат технических наук, доцент

¹Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 367 60 10

²Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь

³Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 293 84 38

⁴Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации», ул. Уборевича, 77, 220096 Минск, Республика Беларусь

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ И МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В статье аналитически исследована зависимость эффективности упрочняющей обработки стальных изделий от параметров комплексного воздействия комбинированной термической и магнитно-импульсной обработки, приводящего к образованию дисперсной структуры. Установлено, что для предотвращения образования микротрещин под воздействием магнитно-импульсной обработки тугоплавких и жаропрочных материалов целесообразно осуществить предварительный нагрев заготовки токами высокой частоты до температур порядка 0,2...0,5 температуры фазового перехода.

Ключевые слова: комбинированная термическая и магнитно-импульсная обработка; энергия импульса; количество импульсов; стальные образцы; фазовое превращение; мелкозернистая структура; упрочнение.

Рис.1. Библиогр.: 16 назв.

A. V. Alifanov^{1,2}, DSc in Technical Sciences, Professor,
D. A. Tsionenko³, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
V. V. Maleronok⁴, A. M. Miliukova¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
I. A. Bogdanovich², PhD in Technical Sciences, Associate Professor

¹State Scientific Institution "Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", 10 Academician Kuprevich Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 367 60 10

²Institution of Education "Baranavichy State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy, the Republic of Belarus

³Educational Establishment "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", 6 P. Brovki Str., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 293 84 38

⁴Educational Establishment "Belarusian State Academy of Aviation", 77 Uborevicha Str., 220096 Minsk, the Republic of Belarus

ANALYTICAL STUDIES OF COMPLEX THERMAL AND MAGNETIC PULSE STRENGTHENING TREATMENT OF STEEL PRODUCTS

The dependence of the efficiency of the steel products hardening treatment on the parameters of the complex effect of combined thermal and magnetic pulse treatment, leading to the formation of a dispersed structure, has been investigated analytically. It has been established that in order to prevent the formation of microcracks under the influence of magnetic pulse processing of refractory and heat-resistant materials, it is advisable to preheat the workpiece

with high-frequency currents to temperatures of the order of 0.2...0.5 phase transition temperature. Preheating also leads to the diffusion processes intensification and the creation of conditions for austenitic-martensitic transformations in the process of magnetic pulse processing.

Key words: combined thermal and magnetic pulse treatment; pulse energy; number of impulses; steel samples; austenitic-martensite transformation; fine-grained structure; strengthening.

Fig.1. Ref.: 16 titles.

Введение. Экспериментальные данные свидетельствуют о влиянии импульсных магнитных полей на изменение структуры поверхности стальных образцов. Одним из эффектов, который обусловлен магнитно-импульсным воздействием, является образование мелкозернистой структуры стали вблизи обрабатываемой поверхности заготовки [1—4]. Этот вывод подтверждается тем, что на соответствующей глубине под обработанной поверхностью происходит изменение физического уширения на дифрактограммах при рентгеноструктурном анализе металла [5—9].

Предварительный нагрев заготовок приводит к интенсификации процессов диффузии и созданию условий для аустенитно-мартенситных превращений в процессе магнитно-импульсного упрочнения (далее — МИУ) [10—12] и интенсификации магнитострикционных процессов образования границ зерен в процессе магнитно-импульсной обработки (далее — МИО) [13—15]. При этом определяющими факторами в дальнейшем процессе дробления зерен являются энергия импульса магнитного поля, содержание углерода и наличие различных легирующих элементов в стали.

Материалы и методы исследования. В Физико-техническом институте НАН Беларуси разработаны, изготовлены и применяются магнитно-импульсные установки (МИУ-2, МИУ-3, МИП-18 и др.) с различными технологическими возможностями, предназначенные для обработки металлических изделий импульсным электромагнитным полем различной напряженности и длительности.

Осуществляя аналитическое исследование, примем некоторые допущения. Проводимые исследования предназначены для анализа упрочняющего влияния МИО на заготовки, сделанные из высоко- и низкоуглеродистых сталей, подвергаемых предварительному нагреву, закалке либо отжигу. В целях осуществления анализа принимается следующая структура обрабатываемого материала: предполагается, что зерна феррита не являются однородными по объему; концентрация углерода повышается при приближении к области границы зерна [14]; для высокоуглеродистых сталей на границах зерен возможно образование пластин цементита и карбидных фаз легирующих элементов; в области границ зерен также существенно повышается концентрация дефектов. Увеличение концентрации примесей и дефектов в области границ зерен приводит к тому, что электро- и теплопроводность уменьшаются от центра к границе зерна.

Результаты исследования и их обсуждение. Рассмотрим зерно феррита, расположенное на глубине h от обрабатываемой поверхности образца. Вследствие этого индукционный ток, возбуждаемый в объеме зерна при импульсном воздействии, будет достигать максимального значения в области, близкой к его границе [14]:

$$j(h, r) = \frac{\mu(r)\mu_0 r}{2\rho(r)} \frac{dH(h)}{dt},$$

где $\mu(r)$ — магнитная проницаемость среды, зависящая от расстояния до центра зерна;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн / м — магнитная постоянная в системе СИ;

$\rho(r)$ — удельное сопротивление, являющееся функцией расстояния до центра зерна;

- $\frac{dH}{dt}$ — скорость изменения вектора напряженности магнитного поля, определяемая параметрами установки, и для рассматриваемого случая равна $\approx 10^{10} - 10^{11}$ А / (м · с) на поверхности образца;
- h — глубина, отсчитываемая от поверхности образца вглубь материала, м.

Зависимость давления от глубины h в процессе МИО описывается формулой [14]:

$$\langle p(h) \rangle_t = \frac{\mu(r)\mu_0}{4} H_0^2 (\exp(-2\alpha h)). \quad (1)$$

Модуль вектора напряженности магнитного поля уменьшается с увеличением расстояния от поверхности вглубь образца [14]:

$$H(h) = H_0 (\exp(-\alpha h)),$$

где $\alpha = \sqrt{\mu\mu_0\omega / 2\rho}$ — величина, обратная толщине скин-слоя в металле,

где $\omega = \frac{\pi}{\tau}$ — циклическая частота, где τ — характерная длительность импульса, равная 10^{-3} с для рассматриваемой установки МИУ [6].

При напряженности магнитного поля $H_{\max} = 10^7$ А / м и магнитной проницаемости среды $\mu = 10^3$ получаем среднее давление на поверхности образца $\langle p(0) \rangle_t = 10^{11}$ Па.

При толщине скин-слоя $\delta = 10^{-4}$ м значение глубины, на которой давление, определяемое формулой (1), превосходит значение предела текучести для феррита, окруженного зернами перлита и равного $\sigma_T = (5 \dots 8) \cdot 10^8$ Па, равно 30...50 мкм. В результате на поверхности обрабатываемого образца в процессе импульсной обработки происходит не только перемещение дислокаций, приводящее к пластической деформации зерна, но и образование дополнительных дефектов: вакансий, краевых и винтовых дислокаций.

Пространственное распределение теплоты, выделяющейся при протекании индукционного тока, определяется неоднородностью структуры стали, что приводит к максимальному разогреву областей вблизи границ зерен. Считаем, что удельное сопротивление материала не изменяется существенно при изменении температуры, плотность материала и удельная теплоемкость постоянны для рассматриваемого диапазона температур.

Поскольку процессы теплопередачи характеризуются временем релаксации во много раз большим, чем время импульса, то процесс выделения тепла будем считать близким к адиабатическому процессу.

Процесс выделения теплоты при протекании индукционного тока происходит в течение малого промежутка времени, который по порядку величины соответствует длительности импульса τ при синусоидальной форме импульса; для изменения температуры в процессе МИО используется выражение [14]:

$$\Delta T = \frac{j^2(r, h) \rho(r) \tau}{2\gamma c},$$

где γ — плотность материала;

c — удельная теплоемкость материала.

Подставляя значения для плотности стали $8 \cdot 10^3$ кг / м³, теплоемкости $5 \cdot 10^2$ Дж / (кг · К) и удельного сопротивления области вблизи границы $\rho = 10^{-6}$ Ом · м, получаем для изменения температуры ΔT оценку $5 \cdot 10^2 \dots 1 \cdot 10^3$ К, что соответствует диапазону температур магнитных превращений и фазовых превращений в стали.

Рассмотрим систему из двух рядом расположенных зерен 1 и 2. Величина переданных из зерна 1 в зерно 2 растягивающих напряжений (по благоприятной плоскости) изменяется с расстоянием от границы зерен. В некоторой точке X зерна 2 эти напряжения будут равны [5—8]:

$$\sigma_x = q\sigma_0 + (\sigma - \sigma_0) \left(\frac{d}{2l} \right)^{0,5},$$

где σ_x — механическое напряжение в точке X зерна;
 q — коэффициент концентрации растягивающих компонент напряжений σ_0 , трещины в зерне 1;
 $\sigma_0 = \sigma_{\Pi} + \sigma_D$ — напряжение сопротивления движущимся дислокациям со стороны растянутых атомов и дисперсных фаз в матрице, дислокационной структуры и субграниц, а также напряжения трения Пайерлса—Набарро [5], где σ_{Π} — напряжение Пайерлса—Набарро:

$$\sigma_{\Pi} = \alpha G \frac{b}{W} e^{-2\pi \left(\frac{W}{b} \right)}, \quad (2)$$

где α — коэффициент, зависящий от геометрии дислокации;
 G — модуль сдвига матрицы;
 b — вектор Бюргерса;
 W — ширина дислокации;
 σ — приведенное касательное внешнее напряжение, превышающее предел текучести сплава;
 d — средний диаметр зерна;
 l — расстояние от границы зерна 2 до рассматриваемой точки X по благоприятной плоскости;

Напряжение σ_{Π} необходимо для того, чтобы осуществить старт незаблокированной прямолинейной дислокации в кристалле:

$$\sigma_D = \alpha_1 G b \sqrt{\rho},$$

где σ_D — напряжение, необходимое для продолжения пластической деформации;
 α_1 — коэффициент, зависящий от кристаллографической структуры металла;
 ρ — плотность дислокаций.

Уравнение (1) позволяет рассчитать напряжение, необходимое для продолжения пластической деформации, и определяет условие образования трещины (скола) в соседнем зерне. Напряжение σ_x должно достигнуть критической величины, равной величине теоретической прочности $\left(\frac{\gamma E}{a} \right)^{0,5}$. Если $\sigma_x = \left(\frac{\gamma E}{a} \right)^{0,5}$, то создаются условия для возникновения новой трещины в зерне 2 как прямого следствия уже имеющейся трещины и развития скольжения в зерне 1. При росте внешнего напряжения этот процесс может распространяться на ряд других зерен (зерно 3 и т. д.). В результате критерий разрушения при постоянной температуре определяется формулой [7]:

$$\sigma_x = q\sigma_0 + (\sigma - \sigma_0) \left(\frac{d}{2l} \right)^{0,5} = \left(\frac{\gamma E}{a} \right)^{0,5}. \quad (3)$$

Давление на поверхности стального образца при указанных выше параметрах обработки составляет $10^{10} \dots 10^{11}$ Па, что превосходит предел текучести стали ($3,55 \cdot 10^8$ Па для стали 45 при 20°C). В результате увеличение внешнего напряжения в соответствии с (2) на границе между зёрнами 1 и 2 приводит к возникновению концентрации растягивающих напряжений. Величина напряжений превосходит значение, определенное критерием (3), т. е. в процессе МИО происходит дробление зёрен в результате их пластической деформации.

Как было отмечено выше, вблизи поверхности на глубине 30...50 мкм наблюдается деформация зёрен феррита, окруженного более твердыми включениями (цементит, перлит). Поскольку деформация связана с перемещением дислокаций внутри зерна, то в результате воздействия устанавливается следующая структура: в направлении, параллельном приложенной нагрузке, дислокации вытесняются на границу зерна, а в перпендикулярном направлении возникают дополнительные механические напряжения. Это препятствует дальнейшей миграции дислокаций и создает условия для образования мелкодисперсной структуры.

Непосредственное возникновение дополнительных границ наблюдается в результате перемещения и образования дислокаций. Перемещение происходит до участков, соответствующих локальным неоднородностям кристаллической решетки, таким как примеси внедрения и замещения, а также междоузельные атомы. Таким образом, наиболее вероятно образование дополнительных границ в областях скопления дефектов кристаллической решетки, а также разориентации отдельных блоков и кластеров. Указанные процессы приводят как к измельчению исходных зёрен, так и увеличению области зерна, прилегающего к границе, являющейся стоком для дефектов.

При этом для высокоуглеродистых сталей деформация зёрен приводит к разрушению пластинок цементита, образующихся на границах зёрен, а в случае существования цементитной сетки — к ее разрушению. Данный процесс вызывает возникновение более однородной структуры, чем структура исходного материала, без существенного изменения твердости образца. Это повышает эксплуатационные свойства материала, в частности сопротивление усталости, уменьшает вероятность разрушения материала по границам зёрен при нагрузках, приложенных по касательной к поверхности [1—3].

Повышение температуры в зоне обработки приводит к уменьшению предела текучести материала и увеличению коэффициента диффузии, т. е. способствует образованию мелкодисперсной структуры. Этот процесс в некоторой степени подавлен для жаропрочных сталей, при обработке которых рекомендуется увеличивать количество импульсов до 5...7 и сокращать время между ними. Целесообразным является также предварительный нагрев поверхности образца, в частности с использованием токов СВЧ.

Рассмотрим роль диффузии углерода и легирующих элементов в процессе образования мелкозернистой структуры. В сплавах железа с углеродом последний находится в состоянии твердого раствора с железом и в виде химического соединения — цементита (Fe_3C). При этом атомы углерода в твердом растворе железа представляют собой примеси внедрения.

Тепловые колебания атомов углерода при низких температурах сводятся в основном к колебаниям с малой амплитудой, которые они совершают около положений равновесия.

Когда температура возрастает на ΔT , амплитуда колебаний Δx_k возрастает на величину, равную

$$\Delta x_k = \sqrt{\frac{2kT}{m_0 \omega_k}},$$

где k — постоянная Больцмана;

m_0 — масса атома;

ω_k — собственная частота колебания атома в кристаллической решетке моды k (частота фонона).

С повышением температуры кристалла количество атомов, обладающих энергией, достаточной для перехода из положения равновесия, увеличивается в соответствии с законом распределения:

$$dN(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N \frac{\exp(-E/(kT))}{(kT)^{3/2}} E^{1/2} dE, \quad (4)$$

где dN — число атомов примесей, энергия которых находится в интервале от E до $E+dE$ при температуре T .

Закон распределения (4) справедлив для систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия. В случае МИО нагревание материала заготовки индукционными токами осуществляется неравномерно вследствие неоднородной структуры стали. Наибольшее тепловыделение происходит вблизи границ зерен феррита и в местах их контакта. При этом время протекания индукционного тока, определяемое периодом магнитного импульса, мало по сравнению со временем релаксации системы. Поэтому закон распределения (4) может быть применен только для локализованных подсистем, которые представляют собой отдельные области зерен. Для граничной области зерна температура выше, а для области, расположенной ближе к центру зерна, температура ниже, поэтому диффузия атомов углерода происходит интенсивнее именно вблизи границ зерен. Для повышения вероятности преодоления потенциального барьера атомами примеси и их перехода в новое положение равновесия целесообразно осуществить предварительный нагрев поверхности заготовки токами высокой частоты на глубину порядка 50 мкм до температур 200...400 °С.

Атомы примесей, обладающие достаточной кинетической энергией, могут покинуть равновесное положения и, преодолев потенциальный барьер, созданный окружающими его атомами железа, перейти в некоторое новое междоузельное положение или стать атомами замещения. Эти процессы наиболее интенсивны при температурах, близких к температуре кристаллизации. При наличии в решетке таких дефектов, как вакантные узлы, дислокации, дислокационные стенки, границы зерен, возрастает вероятность перехода атомов примесей из одного междоузельного положения в другое P_m . Вследствие статистического характера процесса их вероятность изменяется с температурой по экспоненциальному закону:

$$P_m \cong \exp[-E_m(r)/(kT)], \quad (5)$$

где E_m — высота потенциального барьера (энергия миграции вакансий).

При данной температуре вероятность E_m определяется величиной P_m , зависящей от прочности связи атомов в решетке. В случае отсутствия дефектов потенциальные барьеры симметрично расположены в пространстве и имеют одинаковую высоту.

Потенциал парного взаимодействия в данном случае является быстро убывающей функцией расстояния r_{ij} между частицами [16]:

$$\Phi(r_{ij}) = \frac{A}{r_{ij}^6} - B \exp\left(-\frac{r_{ij}}{r_0}\right), \quad (6)$$

где A и B — коэффициенты, определяющие потенциалы сил притяжения и отталкивания соответственно и зависящие от заряда частиц и их взаимного расположения в кристаллической решетке;

r_0 — характерная длина, равная по порядку величины периоду решетки (10^{-10} м).

Таким образом, ближний порядок в расположении атомов определяется потенциалом парного взаимодействия. Пусть в начальном состоянии количество точечных дефектов в необработанном образце незначительно и составляет порядка 10^8 м^{-3} . Тогда при учете рав-

номерности распределения дефектов по объему зерна будем считать, что примесные атомы как внедрения, так и замещения взаимодействуют только с окружающими их атомами железа и непосредственно оказывать влияния друг на друга не могут, так как потенциал парного взаимодействия, определяемый формулой (6), является короткодействующим. Тогда вследствие симметрии расположения атомов железа в узлах объемно-центрированной кристаллической решетки равнодействующая сил, действующих на атом примеси, будет равна нулю.

Если размеры атомов примесей меньше, чем размеры атомов железа, и структура электронных оболочек атомов примеси существенно отличается от структуры атомов железа, то примесь является примесью внедрения. Это характерно для атомов углерода и бора, а для атомов металлов, таких как вольфрам, цирконий, молибден, энергетически более выгодным является их присутствие в качестве примесей замещения.

Рассмотрим силу, действующую на атом примеси в магнитном поле. Направление действия силы вблизи дефекта определяется радиусом атома примеси. При этом для атомов примеси, имеющих радиус меньше, чем радиус атомов кристаллической решетки, энергетически выгодно занять положение вблизи границы, а для атомов, радиус которых больше радиуса атомов, образующих кристаллическую решетку, энергетически более выгодным является положение вдали от границы. Соответствующие силы являются короткодействующими и определяют миграцию примесей на расстояниях порядка 10 периодов решетки вблизи границы зерна. Определим проекцию силы на ось, выбранную перпендикулярно границе зерна:

$$F(x) = \Theta(r_a - r_b) F_0 \exp(-kx), \quad (7)$$

где $\Theta(r_a - r_b)$ — функция, определяющая знак проекции силы;

k — коэффициент, определяющий взаимодействие атомов примеси с внешним магнитным полем, (м^{-1}).

Сила определяется также заполнением электронных оболочек атома примеси. При этом, если полный магнитный момент атома равен нулю, то примесной атом диффундирует в область уменьшения магнитного поля. Это справедливо для атомов углерода и хрома. Для парамагнитных атомов направление диффузии — в сторону увеличения модуля напряженности магнитного поля.

Наиболее активно диффузионное перемещение примесных атомов (или собственных атомов решетки) происходит при наличии дефектов решетки: вакансий, междоузельных атомов и других более сложных дефектов (дислокаций, границ раздела, вакансионных и примесных кластеров). Это связано с тем, что высота потенциальных барьеров зависит от условий, возникающих вблизи дефекта [16].

Таким образом, имеется выделенное направление диффузии. Атомы углерода, являющиеся примесями внедрения, перераспределяются таким образом, что их концентрация в областях, подвергающихся значительной пластической деформации, увеличивается. Это связано с тем, что радиус атомов углерода значительно меньше, чем радиус атомов железа, поэтому они стремятся заполнить области вблизи вакансий, краев дислокаций и границ зерен, образовавшихся в результате пластической деформации.

Согласно формуле (1), с увеличением глубины уменьшается механическое напряжение и, соответственно, концентрация углерода в стали. Такое макроскопическое перераспределение атомов углерода определяется нестационарной диффузией, происходящей непосредственно в процессе импульсного воздействия.

При этом происходит также связанный с перераспределением углерода в объеме каждого зерна процесс, определяющий последствие и происходящий в течение 0,2...48 ч после импульсной обработки. Поскольку зерна феррита окружены зернами перлита и включениями цемента, то в процессе распада этих образований в результате теплового и ударного механического воздействия возникает значительный градиент концентраций углерода. В результате образуется диффузионный поток внутри каждого зерна и атомы углерода переме-

щаются из мест с большей концентрацией в места с меньшей концентрацией, т. е. от границ зерен к центру. С течением времени распределение примесей приводит к уменьшению градиента концентрации. Этот процесс способствует насыщению углеродом зерен феррита и превращению его в перлит при рекристаллизации, происходящей в результате воздействия повторных импульсов, либо в процессе нагрева токами СВЧ.

Поскольку основная система, представляющая собой кристаллическую решетку металла, может рассматриваться как равновесная и количество атомов примеси незначительно по отношению к количеству атомов металла, то справедливо применение уравнения Фоккера—Планка. Основанием для того, чтобы считать большую систему равновесной, является тот факт, что время, за которое происходит изменение температуры материала вследствие теплоотдачи, во много раз превышает время перехода атома примеси из одного равновесного положения в другое. Рассмотрим одномерный случай и ось Ox выберем в направлении, перпендикулярном границе зерна. Тогда уравнение Фоккера—Планка запишется в виде:

$$\frac{\partial \omega(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \omega(x, t)}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(A - \frac{\partial D}{\partial x} \right) \omega(x, t) \right), \quad (8)$$

где $\omega(x, t)$ — вероятность нахождения атома примеси в точке с координатой x в момент времени t ;

D — коэффициент диффузии;

$A = v + \frac{\partial B}{\partial x}$ — скорость смещения частиц под действием силы, выражаемой формулой (7), где $v = F(x)B$ — усиление смещения частиц; B — подвижность частиц, пропорциональная вероятности перехода атома примеси из одного междоузельного положения в другое. Зависимость подвижности от температуры определяется формулой (5).

Результат численного решения уравнения (8) для атомов углерода $\Theta(r_a - r_b) > 0$ в первом приближении при условии постоянства температуры и независимости коэффициентов D и B от пространственной координаты $\left(\frac{\partial D}{\partial x} = \frac{\partial B}{\partial x} = 0 \right)$ представлен на графике (рисунок 1).

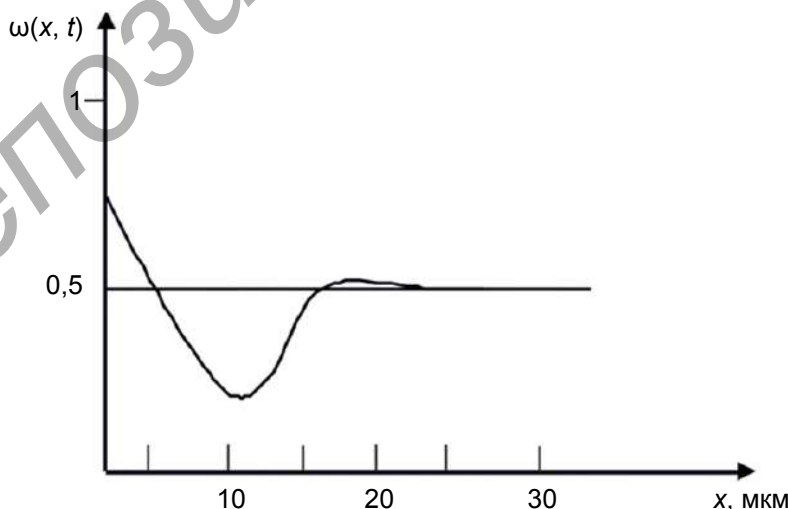


Рисунок 1. — Вероятность нахождения атома углерода $\omega(x, t)$ в точке с координатой x , отсчитываемой от поверхности внутрь обрабатываемого материала без учета процессов последействия

Таким образом, происходит миграция углерода по направлению к поверхности стального образца, подвергаемой МИО.

В процессе импульсной обработки при движении примесных атомов под действием сил в магнитном поле атомы углерода, бора и хрома стремятся покинуть объем зерна и направляются к его границе. При этом область в объеме зерна вблизи границы обеднена углеродом (см. рисунок 1), а на границе зерна феррита образуются пластинки цементита, что приводит к упрочнению поверхности образца как целого. Однако в данном случае образование карбидной сетки не способствует значительному повышению хрупкости. Причиной этого являются процессы рекристаллизации, происходящие вследствие выделения теплоты и приводящие к образованию рваных границ. Как было отмечено в работе [3], вследствие интенсивного тепловыделения на границах зерен, обладающих повышенным удельным сопротивлением, в результате рекристаллизации границы зерен имеют рваные края, что приводит к высокой адгезии между ними и карбидной фазой [4].

В зернах существуют также объемные дефекты, в частности, фрагменты, ориентация которых отличается от ориентации кристаллической решетки основной части зерна, что играет существенную роль при образовании мелкозернистой структуры в процессе импульсной обработки. Более мелкие элементы мозаичной структуры, такие как блоки, разориентация которых составляет менее 1° , в данном приближении не рассматриваются. Образование новых границ внутри зерна обусловлено процессами движения примесей при диффузии с последующей локализацией на границе фрагментов. В результате возникают области, где концентрация примесей достигает предельного значения, что и приводит к обособлению зерен друг от друга. Эти участки, соответствующие новым границам, не обогащены углеродом.

Проанализируем зависимость упрочняющих эффектов от энергии импульса. Энергии импульса менее 2 кДж недостаточно для генерации необходимого количества дефектов. Существенные эффекты начинают проявляться в стали 45 при энергии импульса 4 кДж, для стали 40Х — при энергии импульса 6 кДж, а для стали 8ХФ — 6...8 кДж. Энергии импульсов, превосходящие 8 кДж, приводят к образованию избыточного числа дефектов и могут вызвать разупрочнение образца. Однако при перераспределении легирующих элементов изменяется температура плавления зерен, что приводит к снижению эффективности последующих импульсов. Поэтому наиболее эффективным является количество импульсов, равное 3 [4]. Таким образом, диффузия примесей определяется концентрацией дефектов и величиной магнитного поля, а также длительностью импульса.

Существенную роль играют также процессы последействия, приводящие к установлению более равновесной структуры, а также связанные с повторным импульсным воздействием и нагревом заготовки до температур 200...400 °С [5].

Заключение. В результате анализа механизмов образования мелкозернистой структуры можно сделать следующие выводы.

Наиболее эффективна МИО сталей, легированных хромом и никелем. Такие легирующие элементы, как ванадий и вольфрам, препятствуют измельчению зерен в сталях.

При увеличении содержания углерода в стали до 0,7...0,9 % процесс МИУ характеризуется повышением эффективности. При дальнейшем увеличении содержания углерода возможно образование микротрещин и частичное разрушение материала.

Наиболее эффективным режимом обработки низкоуглеродистых сталей является режим 2...3 импульса в диапазоне энергий 4...6 кДж. Дальнейшее повышение количества импульсов не приводит к существенным изменениям структуры. Увеличение энергии импульса способствует образованию кластеров с предельно допустимой концентрацией дефектов. При этом возможно также образование микротрещин в зоне обработки.

Для предотвращения образования микротрещин при МИО твердосплавных и жаропрочных материалов целесообразным является предварительный нагрев материала заготовки токами ВЧ до температур порядка 0,2...0,5 температуры фазового перехода.

Предварительный нагрев приводит также к интенсификации процессов диффузии и созданию условий для аустенитно-мартенситных превращений в процессе МИУ.

Список цитированных источников

1. *Малыгин, Б. В.* Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. — М. : Машиностроение, 1998. — 130 с.
2. Импульсные методы обработки материалов / Акад. наук Белорус. ССР, Физ.-техн. ин-т. — Минск : Наука и техника, 1977. — 216 с.
3. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов [и др.] // Весті Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. — 2016. — № 4. — С. 31—36.
4. *Орлов, А. С.* Упрочнение сверл методом импульсной магнитной обработки / А. С. Орлов, В. А. Полетаев // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. — 2006. — Вып. 3. — С. 27—28.
5. *Орлов, А. С.* Повышение износостойкости сверл методом импульсной магнитной обработки // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. — 2007. — Вып. 3. — С. 54—55.
6. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлорежущих сверл из быстрорежущей стали / А. М. Милукова [и др.] // Вестн. Баранович. гос. ун-та. Сер. «Технические науки». — 2018. — Вып. 9. — С. 50—56.
7. О природе разрушения поверхности металла, упрочненного импульсной магнитной обработкой / В. А. Полетаев [и др.] // Современная электротехнология в машиностроении : материалы докл. междунар. науч.-техн. конф., Тула, 4—5 июня 2001 г. — Тула : ТулГУ, 2001 — С. 411—416.
8. Формирование поверхностного слоя при упрочняющей обработке / В. А. Полетаев [и др.] // Состояние и перспективы развития электротехнологии : материалы докл. междунар. науч.-техн. конф., Иваново, 4—6 июня 2001 г. — Иваново : ИГЭУ, 2001. — Т. 2 — С. 210.
9. *Малеронок, В. В.* Влияние магнитно-импульсной обработки на фазовые переходы в поверхностном слое режущего осевого инструмента из инструментальной стали / В. В. Малеронок, А. В. Кушнеров, А. В. Алифанов // Вестн. Баранович. гос. ун-та. Сер. «Технические науки». — 2022. — Вып. 1 (11). — С. 24—29.
10. *Воробьева, Г. А.* О структурных превращениях в металлах и сплавах под воздействием импульсной обработки / Г. А. Воробьева, А. Н. Иводитов, А. М. Сизов // Изв. Акад. наук СССР. Металлы. — 1991. — № 6. — С. 131—137.
11. *Овчаренко, А. Г.* Комбинированная магнитно-импульсная обработка режущего инструмента / А. Г. Овчаренко, А. Ю. Козлюк // Обработка металлов. — 2004. — № 2. — С. 8—17.
12. Моделирование процесса магнитно-импульсной обработки с предварительным нагревом осевого режущего инструмента / В. В. Малеронок [и др.] // Вестн. Баранович. гос. ун-та. Сер. «Технические науки». — 2022. — Вып. 2 (12). — С. 24—30.
13. *Орлов, А. С.* Исследование на износостойкость сверл, упрочненных импульсной магнитной обработкой // Прогрессивные технологии в современном машиностроении : сб. ст. III Междунар. науч.-техн. конф., Пенза, 14—16 июня 2007 г. — Пенза : Пенз. гос. технол. ун-т, 2007. — С. 35—37.
14. *Алифанов, А. В.* Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // Литье и металлургия. — 2012. — № 4. — С. 28—35.
15. *Алифанов, А. В.* Технология упрочнения режущего инструмента импульсным магнитным полем / А. В. Алифанов, Н. В. Бурносов, И. Л. Чудакова // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : тр. VI Междунар. Евраз. симп., Екатеринбург, 17—20 мая 2011 г. ; под науч. ред. В. Г. Новоселова ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. гос. лесотехн. ун-т, Урал. лес. технопарк. — Екатеринбург, 2011. — С. 255—260.
16. *Боголюбов, Н. Н.* Проблемы динамической теории в статистической физике / Н. Н. Боголюбов. — М. : Гостехиздат, 1946. — 120 с.

Поступила в редакцию 05.04.2023.

УДК 621.9

А. Н. Жигалов^{1,2}, доктор технических наук, доцент,**И. А. Горавский**², **Л. Л. Сотник**², кандидат технических наук¹Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси», ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030 Могилев, Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru²Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь

ИНТЕНСИВНОСТЬ УДАРНОЙ НАГРУЗКИ И СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ РЕЗАНИИ КОНЦЕВЫМ ФРЕЗЕРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

В статье приведены результаты теоретических исследований влияния количества ударов, интенсивности ударной нагрузки и силового воздействия при резании концевым фрезерным инструментом во взаимосвязи с кинематическим движением зуба такого рода фрезерного инструмента. Показано, что условия работы концевой фрезы являются весьма нестабильными, носят явно выраженный прерывистый характер не только в пределах одного оборота инструмента, когда режущий зуб находится или в контакте с обрабатываемым материалом, или вне его, но и в пределах одного реза. Для повышения ресурса данного инструмента необходимо обеспечить улучшение специальных свойств структуры быстрорежущих сталей, идущих на изготовление такого рода инструмента, способных выдерживать нестабильные, прерывистые нагрузки при резании. Установлено, что условия резания по критерию количества ударов концевым фрезерным инструментом существенно, а именно в два раза, разнятся при врезании и устоявшемся процессе резания по сравнению с выходом из процесса резания. Интенсивность ударной нагрузки на зубе концевой фрезы за один рез при врезании уменьшается от максимальной величины до постоянной, которая присутствует при устоявшемся резании, а затем при выходе зуба из металла увеличивается до максимального значения, в связи с чем наиболее худшими условиями резания, с точки зрения количества ударов и интенсивности ударной нагрузки, являются участки при врезании и выхода из него, что оказывается источником дополнительной нестабильности процесса резания концевым фрезерным инструментом. С помощью математического моделирования установлено, что интенсивность изменения касательной, составляющей силы резания, носит неравномерный характер, отличающийся при разных углах контакта зуба фрезы с заготовкой до 30 раз.

Ключевые слова: концевой фрезерный инструмент; количество ударов; интенсивность ударной нагрузки; силовое воздействие.

Рис. 4. Библиогр.: 12 назв.

A. N. Jigalov^{1,2}, DSc in Technical Sciences, Associate Professor,**I. A. Goravskii**², **L. L. Sotnik**², PhD in Technical Sciences¹State scientific institution "Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus", 11 Byalynitskogo-Biruli Str., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus, + 375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru²Institution of Education "Baranavichy State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy, the Republic of Belarus

INTENSITY OF IMPACT LOAD AND FORCE IMPACT WHEN CUTTING BY THE END-MILLING TOOL

The results of theoretical studies of the number of impacts influence, the intensity of the impact load and the force effect when cutting with an end-milling tool in the conjunction with the kinematic movement of such a milling tool tooth are presented. It is shown that the operating conditions of the end milling tool are very unstable, having a pronounced intermittent character, not only within one revolution of the tool, when the cutting tooth is either in contact with the material being processed, or outside it, but also within one cut. To increase the resource of this tool, it is necessary to improve the special properties of high-speed steels structure used for the manufacture of such tools, capable of withstanding unstable, intermittent cutting loads. It has been established that the cutting conditions, according to the criterion of the number of strokes, by the end-milling tool, significantly, twice, differ during the plunge and the established cutting process, compared with the exit from the cutting process. The intensity of the impact load on the end milling tool tooth for one cut during insertion decreases from the maximum value to a constant value. It is presented during steady

cutting, and then, when the tooth leaves the metal, it increases to the maximum value, and therefore, the worst cutting conditions, with from the intensity of the impact load, there are areas during insertion and exit from it, which are sources of additional instability of cutting process with an axial milling tool. With the help of mathematical modeling, it has been found that the intensity of the change in the tangential component of the cutting force is uneven, differing from each other at different angles of contact of the cutter tooth with workpiece up to 30 times.

Key words: end-milling tool; number of strokes; impact load intensity; force impact.

Fig. 4. Ref.: 12 titles.

Введение. Резание концевым фрезерным инструментом, обеспечивающим обработку путем вращения инструмента без изменения радиуса траектории этого движения и хотя бы с одним движением подачи, направление которого не совпадает с осью вращения лезвийных зубьев, которых должно быть не менее двух, является одним из самых распространенных способов лезвийной обработки металлов. Эффективная работа такого инструмента (концевые, шпоночные и другие фрезы) существенным образом зависит не только от противостояния режущего лезвия инструмента ударным нагрузкам, связанным с врезанием зуба инструмента в обрабатываемый материал и выходом из него, циклическими температурными изменениями на режущем клине во время рабочего и холостого ходов, но и от неравномерности срезаемого слоя материала во время рабочего хода. При этом изменения нагрузки на инструмент, происходящие от неравномерности как толщины, так и ширины срезаемого слоя, образуются от кинематики процесса резания. Лезвийный зуб концевой фрезерного инструмента в процессе резания совершает сложное движение: вращательное вокруг оси инструмента и поступательное вдоль заготовки [1; 2]. Известно, что движение фрезерного инструмента по трохоидальной траектории вызывает затруднения при работе на высокопроизводительных станках с числовым программным управлением [3; 4]. Особенно такое влияние сказывается при высоких частотах вращения шпинделя станка [5; 6]. В исследованиях, в том числе проведенных на основе синергетической концепции, приводятся методологии, позволяющие разрабатывать принципы построения траекторий формообразующих движений зуба фрезерного инструмента [7—9]. Однако существующие разработки не учитывают поведение зуба фрезы в процессе резания в зависимости от параметров инструмента и режимов обработки и не раскрывают закономерности влияния траектории формообразующих движений зуба инструмента от таких параметров на силовые процессы резания.

Авторы определили [10], что толщина a и ширина срезаемого слоя (среза) b от угла поворота фрезы φ при фрезеровании концевым инструментом определяются по зависимостям:

$$a = \sqrt{r_{\phi}^2 + s_z^2 + 2r_{\phi}s_z \sin \varphi} - r_{\phi}, \quad (1)$$

$$b = r_{\phi} \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)}, \quad (2)$$

где r_{ϕ} — радиус фрезы;

s_z — подача на зуб;

φ — угол врезания;

ω — угол подъема зуба фрезы на цилиндрической части фрезерного инструмента, имеющей винтовую форму ($\omega = 30 \dots 15^\circ$).

Установлено, что при увеличении радиуса фрезы r_{ϕ} угол врезания φ уменьшается и, соответственно, повышается плавность процесса резания. Наихудшие условия резания с точки зрения прерывистости обработки происходят в пределах от начала врезания зуба фрезы и поворота его до 30° , а также от 150° и до выхода зуба из обрабатываемого материала, причем в указанных диапазонах поворота зуба фрезы изменения радиуса фрезы приводят к незначительному изменению толщины срезаемого, а именно от 5 и до 13 %. В диапазоне от 30° до 150° поворота зуба фрезы изменение радиуса фрезы практически не оказывает влияние на

изменение толщины среза, а также подачи на зуб на изменение толщины среза пропорционально изменению самой подачи на зуб. Также установлено, что при повороте фрезы до угла,

равного $\varphi = \arccos\left(1 - \frac{t^2}{2r_\phi^2 \operatorname{tg}^2 \omega}\right)$, происходит плавное увеличение ширины среза до заданной

глубины резания t , после поворота фрезы на угол более φ и до угла $180^\circ - \varphi$ ширина среза имеет постоянную величину t , а при угле поворота фрезы на угол более $180^\circ - \varphi$ и до 180° толщина среза плавно уменьшается от величины t до нуля, увеличение радиуса фрезы оказывает пропорциональное влияние на интенсивность изменения толщины среза. Все это обосновывает нестабильность процесса резания концевым фрезерным инструментом.

С учетом полученных результатов исследований [10], указанных выше, стало возможным осуществить проведение теоретических исследований, связанных с определением влияния количества ударов при резании концевым фрезерным инструментом, интенсивности ударной нагрузки и силового воздействия при резании концевым фрезерным инструментом, что происходит от кинематического движения зуба такого рода фрезерного инструмента.

Материалы и методы исследования. Под ударом при резании концевым фрезерным инструментом понимается изменение величины снимаемого припуска от нуля до максимального значения или от максимального значения до нуля. На рисунке 1 представлена схема для определения количества ударов при врезании и устоявшемся резании концевым фрезерным инструментом. Концевой фрезерный инструмент 1 врезается в заготовку 2. Режущий зуб такого инструмента врезается в заготовку в точке 3, а дальнейшее резание осуществляет по дуге 4—5—4.

Как видно из рисунка 1, процесс врезания характеризуется следующим условием:

$$B_0 \leq B \leq 2r_\phi,$$

где B_0 — ширина среза при врезании и выходе зуба фрезы;

B — ширина среза при устоявшемся процессе резания.

Устоявшийся процесс резания происходит при $B = 2r_\phi$.

Угол контакта зуба фрезы с заготовкой φ зависит от ширины среза B и радиуса фрезы r_ϕ :

$$\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{B}{2r_\phi}.$$

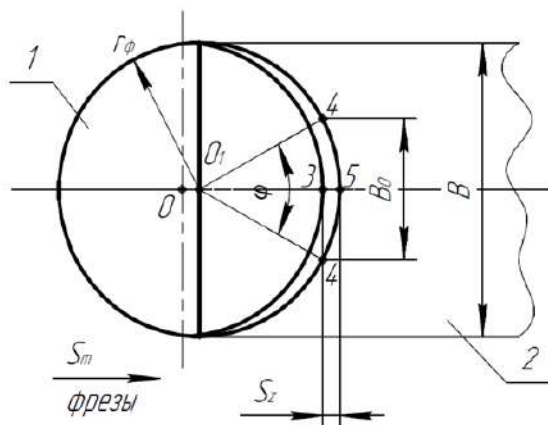


Рисунок 1. — Схема резания концевым фрезерным инструментом

Минимальный угол контакта зуба фрезы φ с заготовкой зависит от радиуса фрезы r_ϕ и подачи на зуб s_z :

$$\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)_{\min} = \frac{r_\phi - s_z}{r_\phi}. \quad (3)$$

Из (3) ширина фрезерования через угол контакта зуба фрезы с заготовкой φ определится как

$$B = 2r_\phi \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right).$$

Длина резания L_p при фрезеровании концевым фрезерным инструментом равна

$$L_p = L_b + L_y + L_{\text{вых}}, \quad (4)$$

где L_b — длина врезания зуба фрезы в металл;

L_y — длина фрезерования при устоявшемся резании;

$L_{\text{вых}}$ — длина выхода зуба фрезы из процесса резания.

При врезании, происходящем на длине резания $L_b \leq r_\phi$, угол контакта зуба фрезы с заготовкой φ изменяется в диапазоне $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$.

При достижении угла контакта зуба фрезы с заготовкой $\varphi = 180^\circ$, что произойдет на длине резания, равной $L_p = r_\phi$, процесс врезания перейдет в устоявшийся процесс резания, который характеризуется максимальным контактом зуба фрезы с заготовкой, осуществляемый на длине резания $L_y > r_\phi$ и до начала процесса выхода из зоны резания $L_{\text{вых}}$.

Исходя из чего, можно записать:

$$L_p = 2r_\phi + L_y. \quad (5)$$

Тогда с учетом того, что за один оборот фрезы зуб имеет два удара, количество ударов зуба фрезы при врезании равно

$$N_{zb} = 2 \frac{r_\phi}{s_z}. \quad (6)$$

Аналогично определяется количество ударов зуба фрезы при устоявшемся резании:

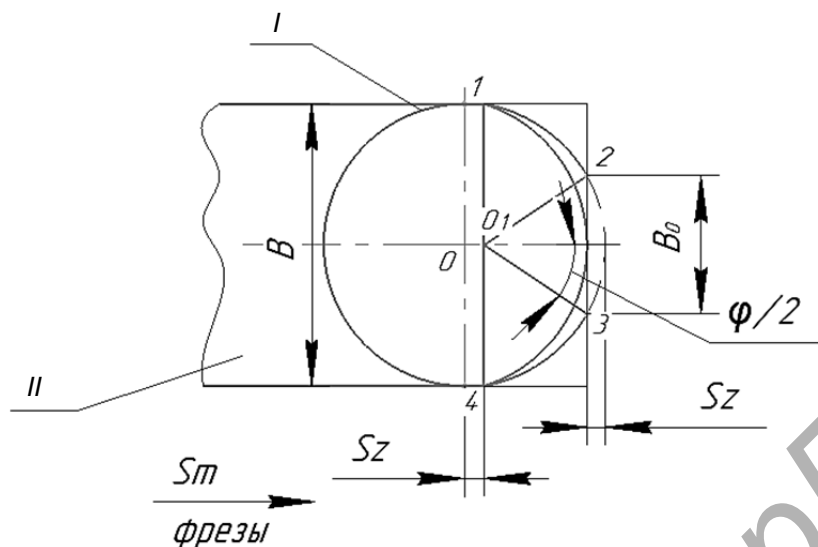
$$N_{zy} = 2 \frac{r_\phi + L_y}{s_z}.$$

На рисунке 2 представлена схема для определения количества ударов при выходе концевой фрезерного инструмента из заготовки.

Как следует из (4) и (5), начало процесса выхода зуба фрезы из зоны резания начинается на длине резания $L_{\text{вых}}$: $L_{\text{вых}} = L_p - r_\phi + L_y$.

При выходе зуба фрезы из процесса резания, что происходит на длине, равной r_ϕ от конца заготовки, во время одного реза зуб фрезы испытывает четыре удара (см. рисунок 2): в точке 1 величина снимаемого припуска начинает изменяться от нуля до максимального значения; в точке 2 — изменяется от максимального значения до нуля; в точке 3 величина снимаемого припуска начинает изменяться от нуля до максимального значения; в точке 4 — величина снимаемого припуска равна нулю. С учетом вышесказанного количество ударов на зубе фрезы при выходе из зоны резания равно

$$N_{zb} = 4 \frac{r_\phi}{s_z}. \quad (7)$$



I — концевой фрезерный инструмент; II — обрабатываемая заготовка; 1, 2, 3, 4 — точки контакта зуба инструмента с заготовкой

Рисунок 2. — Схема определения количества ударов при выходе зуба концевой фрезерного инструмента из заготовки

При врезании и устоявшемся процессе резания каждый зуб фрезы за один оборот испытывает по два удара; при выходе зуба фрезы из процесса резания — по четыре удара. Следовательно, условия резания по критерию количества ударов концевым фрезерным инструментом существенно, а именно в два раза, разнятся при врезании и устоявшемся процессе резания по сравнению с выходом из процесса резания, что значительно увеличивает нестабильность такого процесса резания за счет неравномерности действия ударной нагрузки, действующей на зуб фрезы. Согласно ГОСТам 17026-71 и 17025-71, концевые фрезы с коническим и цилиндрическим хвостовиками имеют до $n = 8$ режущих зубьев. С одной стороны, увеличение количества зубьев на фрезе уменьшат величину нагрузки на каждом зубе за счет перераспределения площади снимаемого слоя. Но с другой стороны, увеличивается количество ударов на фрезе пропорционально количеству режущих зубьев.

Под интенсивностью ударной нагрузки при резании концевым фрезерным инструментом с количеством режущих зубьев фрезы z будем понимать количество ударов N , совершенных на единице площади срезаемого слоя металла S :

$$N_y = \frac{zN}{S}. \quad (8)$$

Величину площади срезаемого слоя металла S_a можно определить путем интегрирования произведения зависимостей толщины a (1) и ширины b (2) срезаемого среза:

$$S_a = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left(\left(\sqrt{r_\phi^2 + s_z^2} + 2r_\phi s_z \sin \varphi - r_\phi \right) \left(r_\phi \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)} \right) \right) d\varphi, \quad (9)$$

где φ_1 — начальный угол контакта фрезы с заготовкой;
 φ_2 — конечный угол контакта фрезы с заготовкой.

Из формулы (9) следует, что площадь срезаемого слоя металла S_a зависит от радиуса фрезы, подачи на зуб, угла подъема зуба фрезы и угла врезания φ .

Для процесса врезания и выхода из процесса резания углы контакта фрезы с заготовкой изменяются от $\varphi_1 = 0^\circ$ (180°) до $\varphi_2 = 180^\circ$ (0°), с учетом чего зависимость (9) примет вид:

$$S_a = \int_0^{180^\circ} \left(\left(\sqrt{r_\phi^2 + s_z^2 + 2r_\phi s_z \sin \varphi} - r_\phi \right) \left(r_\phi \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)} \right) \right) d\varphi - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left(\left(\sqrt{r_\phi^2 + s_z^2 + 2r_\phi s_z \sin \varphi} - r_\phi \right) \left(r_\phi \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)} \right) \right) d\varphi. \quad (10)$$

Из рисунка 2 видно, что $s_z = r_\phi (1 - \sin \varphi)$.

Для устоявшегося процесса резания угол контакта фрезы с заготовкой равен $\varphi = 180^\circ$. Тогда зависимость (10) примет вид:

$$S_a = \left(\sqrt{r_\phi^2 + s_z^2 + 2r_\phi s_z \sin 180^\circ} - r_\phi \right) \left(r_\phi \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos 180^\circ|)} \right).$$

Результаты исследования и их обсуждение. С учетом того, что врезание зуба фрезы в металл и выход его из металла происходят за r_ϕ / s_z резов, и согласно (6)—(8), (10), интенсивность ударной нагрузки будет равна

$$N_y = z k r_\phi / s_z \left[\int_0^{180^\circ} \left(\left(\sqrt{r_\phi^2 + s_z^2 + 2r_\phi s_z \sin \varphi} - r_\phi \right) \left(r_\phi \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)} \right) \right) d\varphi - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left(\left(\sqrt{r_\phi^2 + s_z^2 + 2r_\phi s_z \sin \varphi} - r_\phi \right) \left(r_\phi \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)} \right) \right) d\varphi \right]. \quad (11)$$

где k — количество ударов за один рез (два или четыре).

Количество резов $N_{\text{рез}}$ при фрезеровании заготовки длиной L_p пропорционально значению подачи на зуб s_z и количеству зубьев фрезы z :

$$N_{\text{рез}} = \frac{L_p}{s_z z}.$$

На рисунке 3 представлена интенсивность ударной нагрузки, определенная по зависимости (11), при врезании, устоявшемся резании и выходе из процесса резания на длинах резания для каждого участка, равного радиусу фрезы.

Анализ зависимости (см. рисунок 3) показывает, что интенсивность ударной нагрузки на режущем зубе фрезы, происходящая на единице площади срезаемого слоя металла, при врезании уменьшается от максимальной величины до постоянной, которая присутствует при устоявшемся резании, а затем при выходе зуба из металла увеличивается до максимального значения. Худшие условия резания с точки зрения интенсивности ударной нагрузки — участки врезания в металл и выхода из него, что является источником дополнительной нестабильности процесса резания концевым фрезерным инструментом.

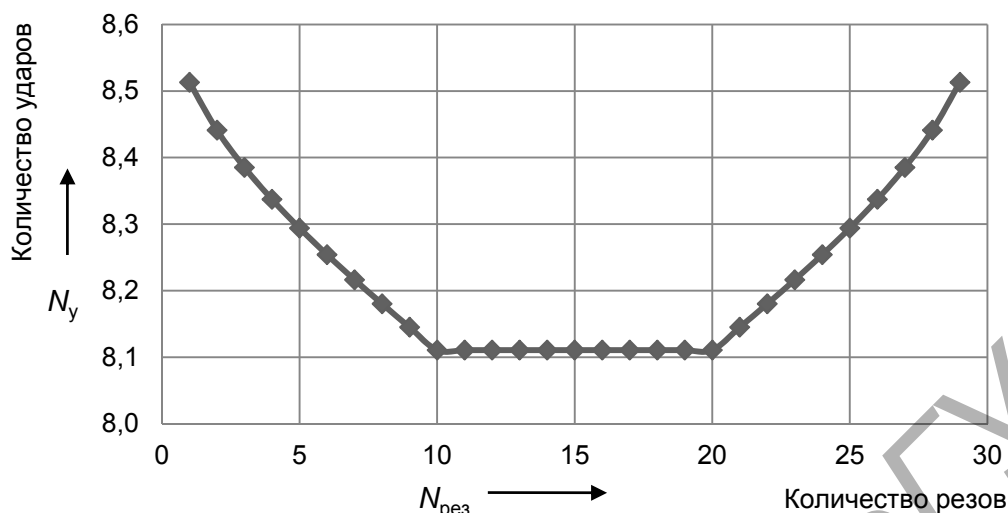


Рисунок 3. — Зависимость интенсивности ударной нагрузки N_y от количества резов $N_{рез}$ при врезании (1...10 резов), устоявшемся резании (10...20 резов) и выходе из процесса резания (20...29 резов) при $r_{\phi} = 6$ мм, $s_z = 0,6$ мм / зуб, $L_p = 18$ мм, $z = 1$ шт.

Силовая модель процесса обработки концевым фрезерным инструментом строится на основе сил резания, действующих в зоне резания [11]. Для производственных целей, как правило, достаточно знать касательную составляющую силы резания P_z , влияющую на мощность оборудования, которая зависит от удельной силы резания q_p (Н / мм²), площади поперечного сечения срезаемого слоя f и определяется по формуле [12]: $P_z = q_p f$.

Площадь поперечного сечения срезаемого слоя f в зависимости от толщины a и ширины b срезаемого среза определяется следующим образом:

$$f = ab. \quad (12)$$

Тогда, подставляя в (12) формулы (1) и (2), получим:

$$P_z = q_p r_{\phi} \left(\sqrt{r_{\phi}^2 + s_z^2 + 2r_{\phi} s_z \sin \varphi} - r_{\phi} \right) \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)}. \quad (13)$$

Удельная сила резания $q_p \approx 1000...5000$ Н / мм² в зависимости от прочности и твердости обрабатываемого материала. Для стали 45 в состоянии поставки прутков $q_p \approx 1600$ Н / мм² [5].

На рисунке 4 представлена графическая интерпретация зависимости (13) при условиях: $r_{\phi} = 6$ мм, $\omega = 30^\circ$, $t = 2$ мм, угол $\varphi_1 = 33^\circ 36'$.

Из рисунка 4 следует, что изменение касательной составляющей силы резания, совершаемой одним зубом концевой фрезы в единицу времени в зоне резания, в пределах одного реза носит явно неравномерный характер: до угла контакта зуба фрезы с заготовкой, равного углу врезания, происходит увеличение касательной составляющей силы резания по увеличивающейся ветви параболы; после полного врезания инструмента изменение касательной составляющей силы резания происходит по зависимости, близкой к полиному второй степени, причем до 90° — по увеличивающей ветви, а после 90° — нисходящей, при выходе зуба из процесса резания; при угле, равном 180° за минусом угла врезания, происходит уменьшение силовой нагрузки по нисходящей ветви параболы до нуля.

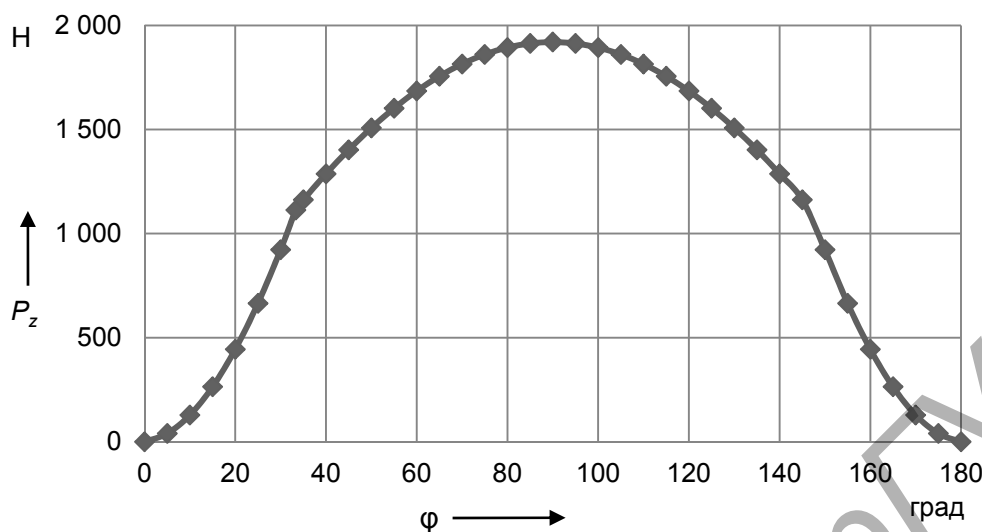


Рисунок 4. — Изменение касательной составляющей силы резания P_z от угла контакта зуба винтовой формы концевого фрезерного инструмента с заготовкой от 0 до 180° ($r_\phi = 6$ мм, $t = 2$ мм, $\omega = 30^\circ$)

Анализ неравномерности изменения касательной составляющей силы резания в пределах резания за один оборот фрезы возможно провести через показатель интенсивности I изменения касательной составляющей силы резания ΔP_z от величины изменения угла контакта зуба фрезы с заготовкой $\Delta\phi$, определяемый по формуле: $I = \Delta P_z / \Delta\phi$.

Из графика (см. рисунок 4) следует, что в пределах резания за один оборот фрезы значения интенсивности существенно отличаются между собой: при ϕ в диапазоне 0...10° интенсивность равна 12,8 Н / град (касательная составляющая силы резания P_z изменяется от нуля до 128,23 Н); при изменении угла контакта зуба фрезы с заготовкой от 10° до 33°36' интенсивность равна 42,1 Н / град ($\Delta P_{z2} = 1112,8 - 128,2 = 984,6$ Н); при изменении угла контакта зуба фрезы с заготовкой от 33°36' до 90° интенсивность — 1,4 Н / град ($\Delta P_{z2} = 1920,0 - 1112,79 = 807,4$ Н). Исходя из чего, в диапазоне угла контакта зуба фрезы с заготовкой от 0° до 90° при увеличении касательной составляющей силы резания P_z интенсивность I изменения касательной составляющей силы резания P_z от величины угла контакта зуба фрезы с заготовкой ϕ может изменяться до 30 раз ($42,1/1,4 = 30$). В диапазоне угла контакта зуба фрезы с заготовкой от 90° до 180° при уменьшении касательной составляющей силы резания P_z изменение интенсивности также может отличаться до 30 раз.

Закключение. Условия работы концевого фрезерного инструмента являются весьма нестабильными, носят явно выраженный прерывистый характер не только в пределах одного оборота, когда режущий зуб инструмента находится в контакте с обрабатываемым материалом и вне его, но и в пределах одного реза. Для повышения ресурса данного инструмента необходимо обеспечить улучшение специальных свойств быстрорежущих сталей, идущих на изготовление их инструментов, которые позволят выдерживать нестабильные, прерывистые нагрузки при резании.

Установлено аналитическим путем, что условия резания по критерию количества ударов концевым фрезерным инструментом существенно, а именно в два раза, разнятся при врезании и устоявшемся процессе резания по сравнению с выходом из процесса резания.

Разработаны математические зависимости, описывающие условия работы концевого фрезерного инструмента, отличающиеся тем, что учитывают кинематические связи между радиусом фрезы, подачей на зуб, углом контакта зуба фрезы с заготовкой и подъемом винто-

вой линии зуба, шириной и длиной фрезерования, количеством ударов при врезании, которые позволяют определить интенсивность ударной нагрузки при врезании и выходе зуба фрезы из процесса резания, а также устоявшемся процессе резания.

Интенсивность ударной нагрузки на режущем зубе концевой фрезерного инструмента, происходящая на единице площади срезаемого слоя металла, при врезании уменьшается от максимальной величины до постоянной, которая присутствует при устоявшемся резании, а затем при выходе зуба из металла увеличивается до максимального значения, в связи с чем создаются худшие условия резания с точки зрения интенсивности ударной нагрузки на участках врезания в металл и выхода из него, что является источниками дополнительной нестабильности процесса резания концевым фрезерным инструментом.

Посредством силового моделирования установлено, что процесс резания концевым фрезерным инструментом является весьма нестабильным и имеет явно выраженный прерывистый характер не только в пределах одного оборота, когда режущий зуб инструмента находится в контакте с обрабатываемым материалом и вне его, но и в пределах одного реза, при этом интенсивность изменения касательной составляющей силы резания носит неравномерный характер, отличающийся при разных углах контакта зуба фрезы с заготовкой до 30 раз.

Список цитированных источников

1. Хвяско, Х. М. Курс теоретической механики : учеб. рук. / Х. М. Хвяско. — Минск : БГТУ, 2000. — 354 с.
2. Чигарев, А. В. Курс теоретической механики : учеб. пособие / А. В. Чигарев, Ю. В. Чигарев. — Минск : Новые знания ; М. : ТСУПЛ, 2010. — 398 с.
3. Бжезинский, А. А. Выбор параметров траектории движения фрезы при высокоскоростном фрезеровании / А. А. Бжезинский, Л. А. Колесников // Машиностроение : респ. межведомств. сб. науч. тр. : по материалам Междунар. науч.-техн. конф. «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении», 6—9 апр. 2010 г. : в 2 т. / Бел. нац. техн. ун-т ; ред. Б. М. Хрусталева. — Минск : БНТУ, 2012. — Вып. 26, т. 1. — С. 17—20.
4. Zakovorotnyi, V. L. Parametric phenomena in processing control in machine-tools / V. L. Zakovorotnyi, A. D. Lukyanov // Applied Sciences and technologies in the United States and Europe : common challenges and scientific findings : 6th International Scientific Conference. — 2014. — P. 113—118.
5. Башаров, Р. Р. Исследование процесса фрезерования концевой фрезой при высоких частотах вращения шпинделя станка / Р. Р. Башаров, Р. Г. Кудояров // Вестн. Уфим. ун-та науки и технологий. — 2012. — Т. 16, № 4 (49). — С. 71—77.
6. Gubanova, A. Investigation of stationary trajectories with associated milling by spur gears [Electronic resource] / A. Gubanova // Dynamic of Technical Systems (DTS-2018) : XIV International Scientific-Technical Conference. — Mode of access: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822602004>. — Date of access: 05.01.2023.
7. Мартыросов, К. Б. Разработка принципов управления траекториями формообразующих движений на основе синергетической концепции : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / К. Б. Мартыросов. — Ростов н/Д, 2006. — 208 л.
8. Zakovorotny, V. L. Bifurcation Properties of Tribosystems. Control and Self-Organization in Nonlinear Systems / V. L. Zakovorotny // Proc. of First Internet : conference, Balistok. — 2000. — P. 109—126.
9. Zakovorotny, V. L. Synergetic Principle in Dinamic Control in Tribosystems. Control and Self-Organization in Nonlinear Systems / V. L. Zakovorotny // Proc. of First Internet : conference, Balistok. — 2000. — P. 127—144.
10. Кинематическое моделирование процесса резания осевым фрезерным инструментом / А. Н. Жигалов [и др.] // Горная механика и машиностроение. — 2022. — № 4. — С. 29—42.
11. Барботько, А. И. Теория резания. Основы процесса резания : учеб. пособие / А. И. Барботько, А. Г. Зайцев. — Старый Оскол : ТНТ, 2020. — 376 с.
12. Резание материалов и режущий инструмент : метод. пособие / сост.: В. Н. Козлов ; Томск. политех. ун-т. — Томск : ТПУ, 2014. — 131 с.

Поступила в редакцию 24.02.2023.

УДК 629.563.424

И. В. Качанов, доктор технических наук, профессор,
К. В. Хвितко, И. М. Шаталов, М. К. Щербакова, А. В. Максимович, И. В. Калиновский
Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65,
220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 292 76 77, kris.hvitko@gmail.com

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВОРОТНОГО УЧАСТКА ПУЛЬПОПРОВОДА ЗЕМЛЕСОСНОГО СНАРЯДА

В статье представлены результаты компьютерного моделирования и предварительных гидравлических исследований поворотного участка нагнетательной трубы землесосного снаряда с различной формой поперечного сечения и выбрана оптимальная овальная форма поперечного сечения поворотного участка нагнетательной трубы. Компьютерное моделирование было проведено в прикладном программном пакете Solid Works, а моделирование течения несжимаемой вязкой жидкости в поворотных участках нагнетательной трубы — на базе математического пакета Cosmos Fleo Works. Лабораторные исследования проводились на изготовленных из органического стекла моделях различных форм поперечного сечения (круглой, прямоугольной, овальной). После проведения исследований установлено, что использование на поворотных участках нагнетательной трубы землесосного снаряда оптимальной овальной формы поперечного сечения дает возможность снизить гидравлические сопротивления на 15...20 % и увеличить производительность землесосного снаряда в целом на 10...15 %.

Ключевые слова: землесосный снаряд; поворотный участок; овальная форма; износ; снижение гидравлических сопротивлений; повышение производительности.

Рис. 8. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

I. V. Kachanov, DSc in Technical Sciences, Professor,
K. V. Khvitsko, I. M. Shatalov, M. K. Scharbakova, A. V. Maksimovitsch, I. V. Kalinovsky
Belarusian National Technical University, 65 Independence Ave., 220013 Minsk,
the Republic of Belarus, +375 (17) 292 76 77, kris.hvitko@gmail.com

COMPUTER MODELING AND LABORATORY HYDRAULIC INVESTIGATIONS OF THE DRIGGER SLURRY PIPE TURNING SECTION

The article presents the results of computer modeling and preliminary hydraulic studies of the injection pipe rotary section of a suction dredger with different cross-sectional shapes and the optimal, oval cross-sectional shape of the injection pipe rotary section is selected. Computer simulation has been carried out in the Solid Works application software package, and the flow simulation of an incompressible viscous fluid in the rotary sections of the injection pipe has been carried out on the basis of the Cosmos Fleo Works mathematical package. Laboratory studies on models made of Plexiglas of various cross-sectional shapes (round, rectangular, oval) have been carried out. After conducting the research, it has been found that using the optimal, oval cross-sectional shape on the turning sections of the dredger suction pipe, it is possible to reduce hydraulic resistance by 15...20 % and increase the productivity of the dredger as a whole by 10...15 %.

Key words: dredge; turning area; oval shape; wear; hydraulic resistance reduction; productivity increase.

Fig. 8. Table 1. Ref.: 7 titles.

Введение. На водотоках и водоемах Республики Беларусь землесосные снаряды (далее — земснаряды) осуществляют дноочистительные и дноуглубительные работы, а также добычу строительного песчаного грунта различного гранулометрического состава. В настоящее время в Республике Беларусь эксплуатируется около 30 земснарядов, которые постоянно сталкиваются с проблемой низкой производительности и энергоэффективности из-за износа и существенного увеличения гидравлического сопротивления нагнетательной трубы грунтового насоса земснаряда, особенно его фасонных элементов: переходников, тройников и поворотных участков нагнетательной трубы (рисунок 1) [1].

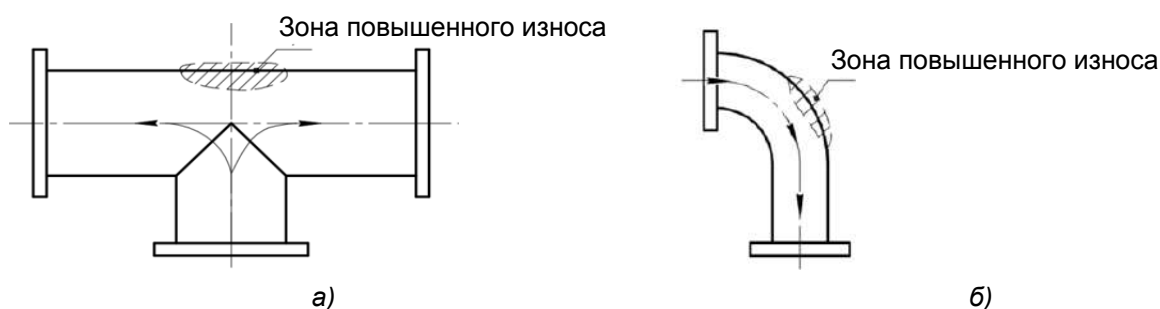


**Рисунок 1. — Поворотный участок пульпопровода:
а — тройник; б — плавный поворот**

Анализ научно-технической литературы и патентно-информационных источников показывает, что снижение гидравлических сопротивлений трубопроводных систем различного назначения и особенно их фасонных элементов является весьма актуальной задачей [2—7]. Наибольший интерес в этом плане вызывают поворотные участки труб, снижение гидравлических сопротивлений которых позволяет снизить общие потери напора в трубопроводных системах в среднем на 15...20 %. На величину гидравлических сопротивлений поворотных участков, кроме общеизвестных геометрических параметров (диаметра трубы d , радиуса R и угла α поворота), существенное влияние оказывает форма поперечного сечения трубы поворотного участка [4], так как стандартная круглая форма поперечного сечения не является оптимальной с гидравлической точки зрения. Подбор оптимальной формы поперечного сечения поворотного участка нагнетательной трубы грунтового насоса земснаряда в перспективе позволит оптимизировать процесс совместной работы грунтового насоса и нагнетательной линии и определить рабочую точку с максимальной производительностью и минимальными энергозатратами при эксплуатации земснаряда.

На кафедре гидротехнического и энергетического строительства, водного транспорта и гидравлики Белорусского национального технического университета (далее — ГЭСВТГ БНТУ) было разработано инновационное отечественное устройство для улучшения гидродинамики перекачиваемой жидкости на поворотных участках трубопроводов путем использования на этих участках поперечного сечения овальной формы (рисунок 2) [7].

На основании указанного устройства [7] и предварительных экспериментальных данных, полученных в лаборатории кафедры ГЭСВТГ БНТУ, была установлена перспективность использования на поворотных участках поперечных сечений овальной формы для снижения потерь напора при движении перекачиваемой жидкости [2; 3].



Рисунок 2. — 3D-модель предложенной (овальной) формы поперечного сечения поворотного участка: а — схема поперечного сечения колена овальной формы; б — компьютерная 3D-модель колена овальной формы

Использование поперечного сечения трубы овальной формы на поворотных участках может существенно (примерно в 1,5 раза) снизить гидравлическое сопротивление поворотного участка (колена) и уменьшить потери напора (механической энергии) при перекачке любой жидкости (в том числе пульпы в нагнетательной трубе грунтового насоса земснаряда), что в свою очередь приведет к увеличению производительности и энергоэффективности работы земснаряда в целом на 20...30 %, а также попутно снизит износ поворотных участков.

Целью работы является компьютерное моделирование и лабораторные исследования гидродинамики поворотного участка нагнетательной трубы землесосного снаряда и экспериментальное определение его основных гидродинамических характеристик (средней скорости v , расхода Q , потерь напора $h_{\text{стр}}$).

Материалы и методы исследования. Для проверки теоретических предположений о гидродинамике перекачиваемой жидкости на поворотных участках нагнетательной трубы земснаряда на кафедре ГЭСВТГ БНТУ было проведено компьютерное моделирование и предварительные экспериментальные исследования в гидравлической лаборатории поворотных участков (колена с углом поворота на 90°) нагнетательной трубы с различными формами поперечных сечений: круглой, прямоугольной и овальной.

При проведении компьютерного моделирования учитывалось, что наиболее эффективной формой поперечного сечения любого гидравлического канала с гидродинамической точки зрения (максимальная пропускная способность при минимальном гидравлическом сопротивлении) является криволинейная форма: параболическая или полукруглая — для открытых каналов, эллиптическая или овальная — для каналов замкнутого профиля. Это связано с тем, что у каналов криволинейной формы поперечного сечения имеет место минимальное значение смоченного периметра χ и максимальное значение гидравлического радиуса R при эквивалентных (равных) площадях живого сечения S , а также отсутствуют угловые сконцентрированные вторичные вихревые течения. Поэтому для проведения сравнительного анализа и выбора оптимальной формы поперечного сечения поворотного участка нагнетательной трубы были выбраны три самые технологичные (с точки зрения их изготовления) формы: круглая, прямоугольная, овальная.

Компьютерное моделирование поворотных участков нагнетательной трубы земснаряда различной формы поперечного сечения и разработка их твердотельной модели проводились в прикладном программном пакете Solid Works, а моделирование течения несжимаемой вязкой жидкости в поворотных участках нагнетательной трубы осуществлялось на базе математического пакета Cosmos Fleo Works.

Для проведения компьютерного моделирования течения рабочей жидкости внутри проточной части с различной формой поперечного сечения поворотного участка нагнетательной трубы была создана обобщенная имитационная математическая модель течения несжимаемой вязкой жидкости на основе уравнений Навье—Стокса [2; 3]:

$$\vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p = \frac{d\vec{u}}{dt} - \nu \nabla^2 \vec{u},$$

где $\vec{F}$	— вектор массовых сил, отнесенных к единице массы жидкости;
ρ	— плотность жидкости;
$\text{grad} p$	— градиент давления;
$\frac{d\vec{u}}{dt}$	— вектор ускорения инерционных сил в заданной точке объема жидкости;
ν	— кинематический коэффициент вязкости;
$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$	— оператор Лапласа;
$\vec{u}$	— вектор местной скорости.

Совместно с уравнением Навье—Стокса использовалось уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0.$$

Для проверки сделанных выше предположений в гидравлической лаборатории кафедры ГЭСВТГ БНТУ были проведены предварительные лабораторные исследования трех моделей поворотных участков (рисунок 3), выполненных из оргстекла с круглой, прямоугольной и овальной формой поперечного сечения моделей. На рисунке 4 представлен фрагмент лабораторных исследований трубы круглого поперечного сечения.

Предварительные исследования проводились с использованием в качестве рабочей жидкости водопроводной воды, которая подавалась в лабораторные модели поворотных участков из напорного резервуара при постоянном гидростатическом напоре $H = 2$ м водного столба, угол установки отводящей трубы модели поворотного участка был равен 30° .

В процессе проведения предварительных исследований для оценки производительности моделей измерялся объемный расход Q л / с, а для оценки величины гидравлического сопротивления моделей измерялась дальность отлета струи $h_{\text{стр}}$.

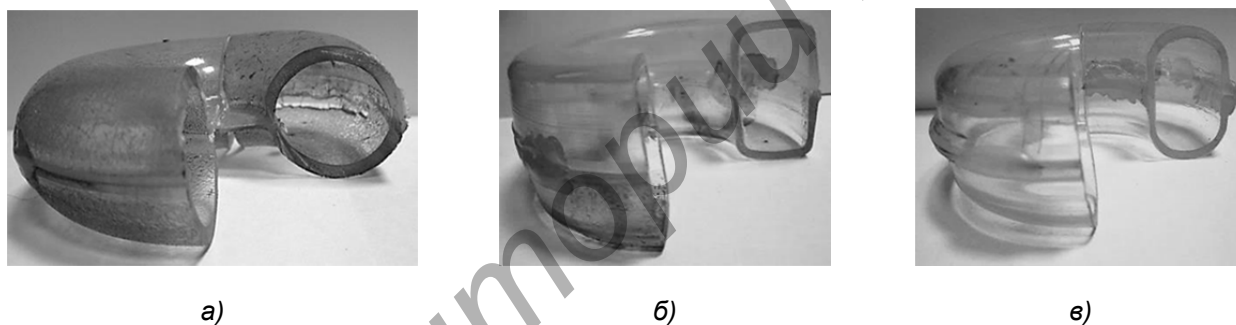
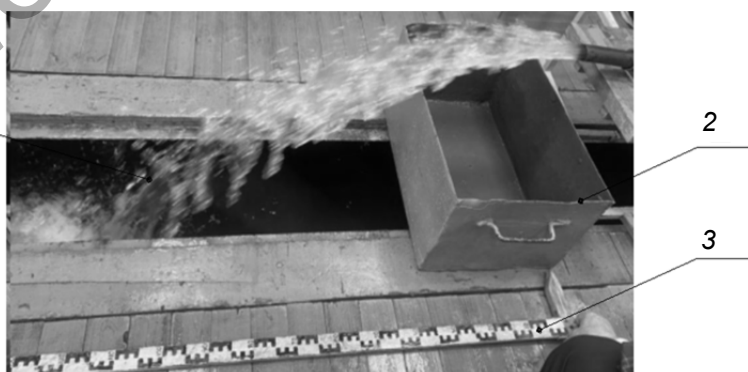


Рисунок 3. — Лабораторные модели поворотных участков трубы различных форм поперечного сечения: а — круглая; б — прямоугольная; в — овальная



1 — струя; 2 — бак; 3 — мерная линейка

Рисунок 4. — Лабораторные исследования поворотного участка трубы круглого поперечного сечения

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты компьютерного моделирования представлены на рисунках 5, 6, 7.

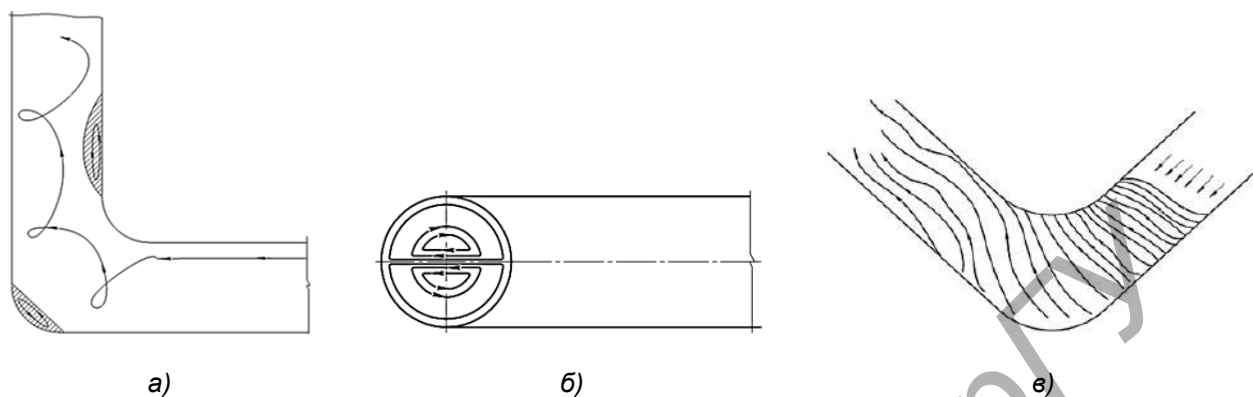


Рисунок 5. — Схема формирования «парного вихря» в круглом поперечном сечении трубы земснаряда: а — образование продольного вихревого течения на поворотном участке круглого поперечного сечения; б — «парный вихрь» в колене круглого поперечного сечения; в — абсолютные линии тока в колене круглого поперечного сечения

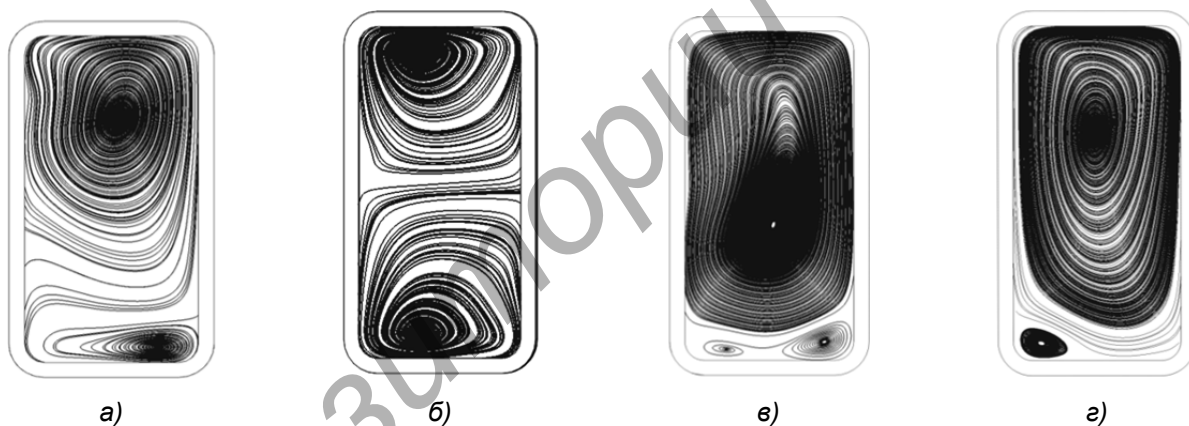


Рисунок 6. — Схема формирования «парного вихря» в прямоугольном поперечном сечении трубы земснаряда: а — на входе в колено; б — в наивысшей точке; в — на выходе из колена; г — в отводящей трубе

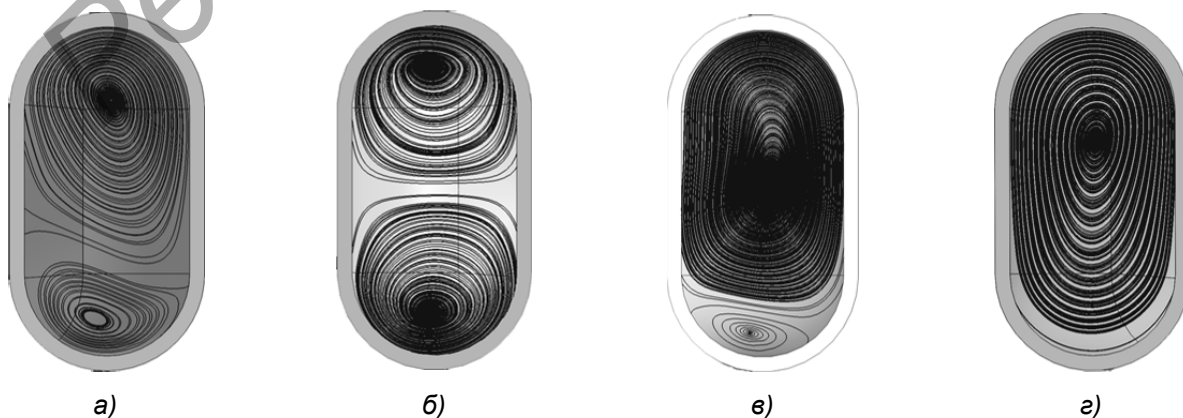


Рисунок 7. — Схема формирования «парного вихря» в овальном поперечном сечении трубы земснаряда: а — на входе в колено; б — в наивысшей точке; в — на выходе из колена; г — в отводящей трубе

Компьютерное моделирование показало, что на поворотном участке трубы (колени с углом поворота 90°) скорость движения жидкости изменяет свое направление, что сопровождается искривлением линий тока (поворот потока) и появлением центробежных сил, приводящих к тому, что по направлению от центра кривизны давление увеличивается, а скорость, соответственно, падает, и наоборот, по направлению к центру кривизны скорость возрастает, а давление падает. Поэтому в колене при переходе жидкости из прямолинейного участка в изогнутый скорость вблизи внутренней стенки повышается, а давление, соответственно, уменьшается, т. е. возникает конфузторный эффект. Вблизи внешней стенки колена происходит обратное явление: скорость падает, а давление растет, т. е. возникает диффузорный эффект. Переход жидкости из изогнутой части в прямолинейный участок (после поворота потока) сопровождается противоположными явлениями: диффузорным эффектом вблизи внутренней стенки и конфузторным эффектом вблизи внешней стенки. Диффузорные явления приводят к соответствующему отрыву потока от обеих стенок. При этом отрыв от внутренней стенки усиливается стремлением потока по инерции двигаться прямолинейно, в данном случае — по направлению к внешней стенке (см. рисунок 5).

Вихревая зона, возникающая вследствие отрыва потока от внешней стенки, незначительна: она заполняет только внешний угол поворота, не стесняя заметно сечения основного потока. Наоборот, отрыв от внутренней стенки приводит к интенсивному вихреобразованию, зона которого распространяется далеко за изгибом трубы (см. рисунок 5).

Помимо вихревых областей у внутренней и внешней стенок, в изогнутой трубе возникает ещё «парный вихрь», появление которого обуславливается наличием пограничного слоя и, соответственно, ядра потока с максимальными скоростями. Ядро, стремясь в изогнутой трубе двигаться по инерции в направлении к внешней стенке, расположенной дальше от центра кривизны трубы, в силу неразрывности движения заставляет более медленные слои жидкости в пограничном слое двигаться вблизи обеих боковых стенок в сторону внутренней стенки поворота, расположенной ближе к центру кривизны трубы, в результате чего в поперечном сечении трубы возникают два вихря (см. рисунки 5, 6, 7).

Вторичные токи, создаваемые «парным вихрем», накладываются на главный поток, параллельный оси трубы, и в результате придают линиям тока винтообразную форму, которая распространяется на прямой участок за изгибом и исчезает весьма медленно на большой длине. Практически закручивание потока заканчивается на длине 10...15 калибров.

«Парный вихрь» в потоке воды на поворотном участке нагнетательной трубы земснаряда формируется постепенно. На входе в колени он имеет несимметричную форму, как и на выходе из него (см. рисунки 6, 7). Это связано с неравномерным распределением центробежных сил на вогнутой поверхности колена. На входе в колени действие центробежных сил увеличивается, достигая максимального значения в наивысшей точке. В связи с этим на входе в колени «парный вихрь» имеет форму сплюснутых несимметричных поверхностей, причем площадь вихря у внешней (вогнутой) стенки значительно больше площади вихря у внутренней (выпуклой) стенки колена. При перемещении потока воды к наивысшей точке колена «парный вихрь» приобретает симметричную форму с одинаковыми площадями вихрей.

Далее при переходе потока воды от наивысшей точки к выходу из колена действие центробежных сил постепенно затухает, а «парный вихрь» вновь приобретает несимметричную форму, но в этом случае площадь вихря у внешней стенки увеличивается, а площадь вихря у внутренней (выпуклой) стенки уменьшается (см. рисунки 6, 7). В отводящей трубе (т. е. за коленом) «парный вихрь» полностью исчезает, и на участке трубы 10...15 калибров сохраняется только общее винтовое течение, которое постепенно затухает, и поток приобретает нормальную структуру (рисунок 8).

В колени круглого поперечного сечения «парный вихрь», как показало компьютерное моделирование, имеет форму двух сплюснутых круговых поверхностей с большой площадью поверхности контакта (см. рисунок 5, б), что может привести к увеличению гидравлического сопротивления колена в целом. К тому же такой «парный вихрь» имеет значительный по величине момент инерции, который также оказывает существенное влияние на величину потерь механической энергии на поворотном участке нагнетательной трубы земснаряда [6].

В колене прямоугольного поперечного сечения с соотношением сторон меньшей к большей 1:2 (большая сторона направлена по нормали к оси кривизны колена) и в колене круглого сечения происходит постепенное формирование «парного вихря» от входа к наивысшей точке и выходу (см. рисунок 6).

Но в этом случае две части «парного вихря» вытягиваются вдоль большей оси прямоугольного сечения, площадь поверхности их контакта значительно уменьшается (в 1,2...1,3 раза), что может привести к снижению гидравлического сопротивления. Однако компьютерное моделирование показало, что прямоугольная форма поперечного сечения не является оптимальной, так как у «парного вихря» сохраняется плоскость контакта вихрей, а в углах прямоугольного сечения появляются локальные вихревые течения. К тому же сохраняется довольно большое значение момента инерции «парного вихря» [6].

Анализ результатов компьютерного моделирования колен с круглым и прямоугольным поперечным сечением показал, что минимальным моментом инерции обладает круговое сечение вихря [6], к тому же круговое сечение имеет не плоскость, а линию контакта вихрей, что, в свою очередь, может привести к снижению гидравлического сопротивления колена в целом.

Обобщая вышеизложенное, можно прийти к выводу, что основной формой поперечного сечения может быть выбрана овальная форма с соотношением меньшей оси к большей 1:2 (как у прямоугольной), причем большая ось овала направлена по нормали к оси кривизны колена.

Компьютерное моделирование такого колена показало, что соотношение малой и большой осей 1:2 не является оптимальным, так как «парный вихрь» сохраняет ярко выраженную сплюснутую форму (см. рисунок 7). Это явление можно полностью или почти полностью устранить, увеличив соотношение осей овала до 1:3 или 1:4, сохраняя направление большей оси по нормали к оси кривизны колена. Следует отметить, что у овальной формы поперечного сечения отсутствуют угловые локальные вихревые течения, что является преимуществом по сравнению с прямоугольным сечением.

К тому же применение овальных сечений с соотношением малой к большей осей 1:3 или 1:4 позволит придать «парному вихрю» круговую форму с минимальным моментом инерции и линией (а не плоскостью) контакта «парного вихря», согласно нашему предположению, что дает возможность снизить гидравлическое сопротивление от 1,5 до 2 раз.

Сравнительный анализ результатов проведенного компьютерного моделирования показал, что наиболее оптимальной формой поперечного сечения поворотного участка (колена) нагнетательной трубы земснаряда с углом поворота 90° является овальная форма с соотношением малой и большой осей 1:3 или 1:4, причем большая ось кривизны должна быть направлена по нормали вдоль оси кривизны колена.

Основные результаты проведенных предварительных лабораторных гидравлических исследований приведены в таблице 1.



Рисунок 8. — Схема исчезновения «парного вихря» на выходе из колена

Т а б л и ц а 1. — Результаты лабораторных испытаний

Форма поперечного сечения	Расход, л / с	Средняя скорость, м / с	Дальность полета, м
Круглая	2,71	0,1570	1,05
Прямоугольная	2,88	0,1675	1,22
Овальная	3,00	0,1740	1,32

Анализ приведенных в таблице 1 результатов гидравлических исследований показывает, что изменение формы поперечного сечения колена от круглого до прямоугольного и затем овального приводит к увеличению расхода Q в среднем на 10 %, скорости v — на 10 % и дальности полета струи (т. е. уменьшению гидравлического сопротивления) — на 25 %.

Проведенное компьютерное моделирование и предварительные лабораторные гидравлические исследования позволили сделать следующие выводы:

- стандартная круглая форма поперечного сечения колена напорной трубы земснаряда не является оптимальной с точки зрения минимизации гидравлического сопротивления (потерь напора);

- наиболее оптимальными сечениями с точки зрения минимизации гидравлического сопротивления (потерь напора) является прямоугольное и овальное сечения;

- по производительности прямоугольное сечение превосходит круглое на 5...10 %, а по снижению гидравлического сопротивления — на 10...15 %;

- использование овального сечения позволяет увеличить производительность на 10...15 % по сравнению с круглым и снизить гидравлическое сопротивление на 15...25 %.

Также был установлен характер изменения контактной поверхности «парного вихря» для различных форм поперечного сечения поворотного участка нагнетательной трубы земснаряда (см. рисунки 5, 6, 7) и влияние формы поперечного сечения поворотного участка нагнетательной трубы земснаряда на его основные гидравлические характеристики (дальность отлета струи $h_{стр}$, расход жидкости Q , средняя скорость v (см. таблицу 1) .

Заключение. Проведенное компьютерное моделирование и предварительные лабораторные гидравлические исследования моделей поворотных участков (колен) нагнетательной трубы грунтового насоса земснаряда показали, что наиболее оптимальной формой поперечного сечения колена является овальная, что позволяет увеличить производительность земснаряда минимум на 10...15 %; уменьшить гидравлическое сопротивление на 15...20 % с последующим возможным снижением износа поворотного участка нагнетательной трубы земснаряда. Представленные в статье результаты компьютерного моделирования и лабораторных гидравлических исследований подлежат дальнейшему детальному исследованию и уточнению.

Список цитированных источников

1. Шкундин, Б. М. Землесосные снаряды : учеб. пособие / Б. М. Шкундин. — 2-е изд., перераб. — М. : Энергия, 1973. — 272 с.
2. Математическая модель движения огнетушащей жидкости в проточном тракте лафетного ствола с винтовой структуризацией потока / И. В. Качанов [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. — 2013. — № 2. — С. 156—164.
3. Теоретические и компьютерные исследования дальнобойного пожарного лафетного ствола при ликвидации чрезвычайных ситуаций на объектах промышленного и гражданского назначения / И. В. Качанов [и др.] // Проблемы управления речными бассейнами при освоении Сибири и Арктики в контексте глобального изменения климата планеты в XXI веке : сб. докл. XIX Междунар. науч.-практ. конф., Тюмень, 17 марта 2017 г. : в 3 т. / Тюмен. гос. ун-т ; редкол.: А. Б. Храмцов (отв. ред.) [и др.]. — Тюмень, 2017. — Т. 1. — С. 59—64.
4. Идельчик, И. Е. Гидравлические сопротивления / И. Е. Идельчик. — М. ; Л. : Гос. изд-во, 1954.
5. Некрасов, Б. Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Б. Б. Некрасов, Я. М. Вильнер, Я. Т. Ковалев. — Минск : Выш. шк., 1985. — 368 с.
6. Некрасов, Б. Б. Гидравлика и ее применение в летательных аппаратах / Б. Б. Некрасов. — М. : Машиностроение, 1967. — 368 с.
7. Пожарный монитор [Электронный ресурс] : пат. 21238 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) A62C31/02 / И. В. Качанов [и др.] ; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. — № а 20140385 ; заявл. 28.02.16 ; опублик.: 31.10.2017 / Нац. центр интелект. собственности. — Режим доступа: <https://rep.bntu.by/bitstream/data/59065/1/21238.pdf> . — Дата доступа: 10.03.2023.

Поступила в редакцию 06.04.2023.

УДК 62-977; 536.212

И. В. Плетенев

Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, 220013 Минск,
Республика Беларусь, +375 (017) 292 81 85, ipletenev@mail.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООТВОДА МЕДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ДИФфуЗИОННЫМ ЗАЩИТНЫМ СЛОЕМ

В работе отмечены перспективы использования термодиффузионного упрочнения для защиты от высоких температур медных элементов различного технологического оборудования. Исследованы структуры диффузионных слоев, полученных на технической меди марки М1 после обработки в насыщающей порошковой среде. Среда обеспечивает комплексное насыщение поверхности несколькими элементами, преимущественно алюминием. Для исследования теплофизических свойств медного пластинчатого элемента с диффузионным слоем разной толщины исследована скорость нагрева его газовым пламенем. По результатам эксперимента с учетом выбранной расчетной модели, построенной на основе теплового баланса, получены данные по коэффициенту теплопроводности диффузионного слоя, который выражается интегральным показателем. На основании скорости нагрева и разности температур в контрольных точках по длине элемента проведена оценка эффективности теплоотвода пластинчатого медного элемента с различной толщиной диффузионного слоя.

Ключевые слова: медь; теплопроводность; алитирование меди; жаростойкость; порошковые среды; диффузионный слой.

Рис. 5 Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.

I. V. Pletenev

Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus,
+375 (017) 292 81 85, ipletenev@mail.ru

ESTIMATION OF COPPER ELEMENTS HEAT REMOVAL EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT WITH A DIFFUSION PROTECTIVE LAYER

The paper notes the prospects for using thermal diffusion hardening to protect copper elements of various technological equipment from high temperatures. The structures of diffusion layers obtained on M1 grade technical copper after processing in a saturating powder medium have been investigated. The medium provides a complex saturation of the surface with several elements, mainly aluminium. For research the thermophysical properties of a copper plate element with a different thicknesses diffusion layer, the rate of its heating by a gas flame has been studied. According to the results of the experiment, taking into account the selected calculation model built based on the heat balance, data have been obtained on the thermal conductivity coefficient of the diffusion layer, which is expressed by an integral indicator. The heat removal efficiency of a lamellar copper element with different thicknesses of the diffusion layer has been evaluated. The evaluation has been carried out based on the heating rate and the temperature difference at the control points along the length of the element.

Key words: copper; thermal conductivity; copper aluminizing; heat resistance; powder media; diffusion layer.

Fig. 5. Table 1. Ref.: 11 titles.

Введение. Медь и ее сплавы традиционно используются при изготовлении теплоотводящих элементов технологического оборудования: кристаллизаторы и фурмы металлургического производства, различные охлаждающие устройства химической отрасли, например, подфиллерные холодильники стекольного производства и пр., которые эксплуатируются в условиях воздействия высоких температур и агрессивных сред в виде паров и веществ, вызывающих активную коррозию поверхности изделий [1—3]. Обладая высокой теплопровод-

ностью, медь имеет низкие жаростойкость и коррозионную стойкость в некоторых средах, в частности, быстро разрушается под действием серы и ее соединений [4; 5].

Способов защиты меди и медных сплавов в настоящее время достаточно много, все они направлены на создание барьерного слоя на поверхности изделия. Одним из наиболее рациональных способов защиты от высокотемпературного окисления и коррозии меди является термодиффузионное насыщение элементами, образующими при окислении плотные устойчивые оксидные слои [6—8]. Такими элементами могут являться Al, Si, Ti. Однако неизученность вопроса применения такого вида упрочнения для работающих в конкретных производственных условиях изделий сдерживает промышленное применение, поскольку к основному воздействию температурного поля добавляется специфичное коррозионное воздействие агрессивной среды.

Данная работа посвящена исследованию влияния термодиффузионного упрочнения медных теплоотводящих холодильников стекольного производства на формирование защитных свойств покрытий и сохранение высоких показателей теплопроводности.

Условия работы теплоотводящих элементов стекольного производства, в частности ламельного холодильника, сложные, имеют циклический характер, температура в зоне отвода тепла достигает $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 1). Атмосферу вокруг холодильника, часто агрессивную, формируют компоненты шихты при стекловарении. Наибольшей летучестью обладает борная кислота, если выпускается модификация стекла с бором, ее соли, оксид свинца, оксид сурьмы и другие соединения, а также хлориды.

Очевидно, что получаемый защитный диффузионный слой, располагаясь на поверхности холодильника, будет являться тепловым сопротивлением, в результате действия которого замедлится теплопередача в каждом медном элементе от поверхности вглубь изделия. Для конкретных изделий замедление может являться критичным, что подчеркивает актуальность вопроса исследования теплопроводности и доказательства эффективного отвода тепла через термодиффузионный защитный слой.

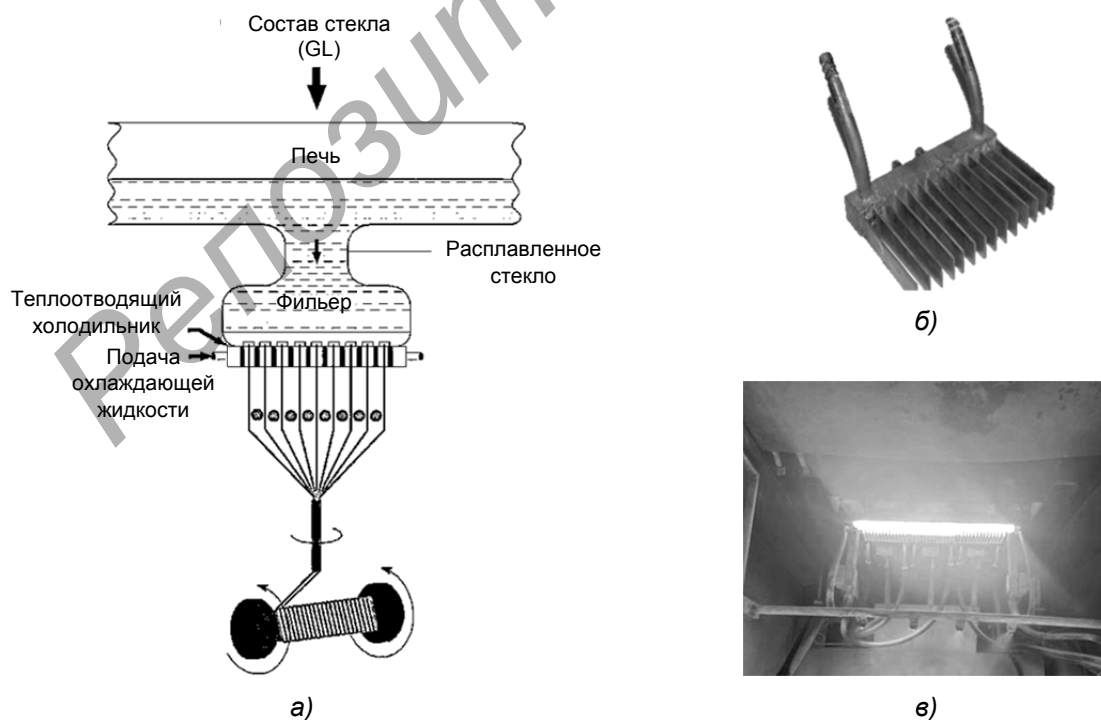
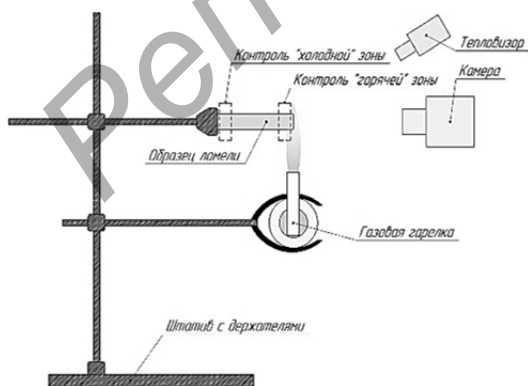


Рисунок 1. — Схема работы теплоотводящего холодильника стекольного производства (а), внешний вид холодильника ламельной конструкции (б) и его работа в составе установки (в)

По данным производителя, занимающегося защитными покрытиями, наносимыми на изделия металлургического производства, коэффициент теплопроводности слоя из гальванического никеля может составлять, в частности $80 \text{ Вт} / \text{м} \cdot \text{К}$ (сплав АМС — НWR, Германия), слоя, полученного плазменным напылением, — не более $30 \text{ Вт} / \text{м} \cdot \text{К}$ и т. д. [9]. Для термодиффузионных слоев таких данных не приводится по причине, во-первых, недостаточно частого использования рассматриваемого варианта, во-вторых, особенностей структуры: слоистости и выраженного градиента свойств по глубине слоя.

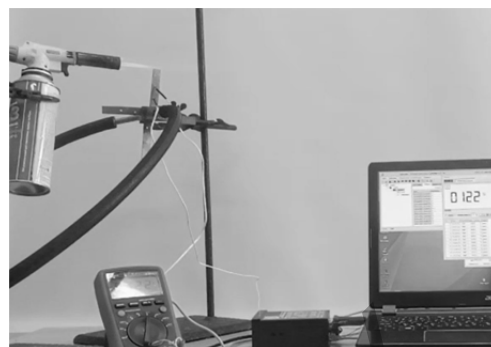
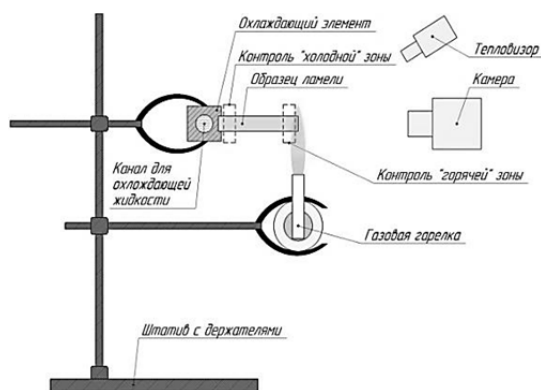
Материалы и методы исследования. Термодиффузионное насыщение проводили в порошковой среде при печном нагреве в герметичном контейнере с плавким затвором. Режим обработки: температура — 560°C , время — 2...6 ч. Для проведения процесса использована шахтная электрическая печь с селитровыми нагревателями. Насыщение меди марки М1 ГОСТ 1173 проводили в порошковой среде, приготовленной на основе алюминия марки ПА-2 по ГОСТ 5494 с добавкой инертного наполнителя (оксид алюминия — Al_2O_3 , ГОСТ 3136), активатора (аммоний хлористый — NH_4Cl , ГОСТ 2210) и продуктов реакции алюмотермического восстановления оксидов хрома и бора.

Исследование теплопроводности проводили, осуществляя нагрев медной пластины (ламели) размером $70 \times 15 \times 1,5 \text{ мм}$ со слоем и без диффузионного слоя газовым пламенем с разной интенсивностью и контролем температуры «холодной» и «горячей» части пластины (рисунок 2). Под «холодной» зоной подразумевается участок, дальний от места нагрева, в нашем случае находящийся на расстоянии 50 мм от нагреваемого торца, а под «горячей» — участок ближе к зоне нагрева, находящийся на расстоянии 30 мм от нагреваемого торца. Измерение температуры и регистрация ее распределения (в зоне высоких температур) выполнялись с использованием температурного оптического измерителя ИТ-3СМ (высокотемпературный трехзональный термовизор) на специально подготовленном стенде. Контроль температуры выполнялся термометром инфракрасным Mestek IR01D, регистрация температуры «холодной» части пластины — мультиметром UNI-T UT61C с термопарой (1-я точка контроля), «горячей» — измерителем-регулятором «Сосна-003М» с термопарой (2-я точка контроля), приборы передавали данные на компьютер для их последующего анализа. Нагрев производился в двух вариантах, обусловленных особенностями режима теплообмена. Стационарный режим теплообмена отличался от нестационарного наличием принудительного водяного охлаждения участка, противоположного нагреваемому торцу испытываемого ламельного элемента (рисунок 2).



а)

Рисунок 2. — Схема стенда и его внешний вид для исследования теплопроводности ламельных элементов из меди в случае нестационарного (а) и стационарного режимов (б)



б)

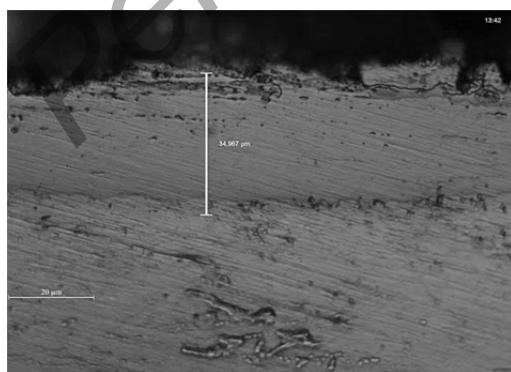
Окончание рисунка 2

Результаты исследования и их обсуждение. Исходя из полученных результатов металлографического и рентгеноструктурного исследований образцов после насыщения, можно отметить следующее: структура образующегося защитного слоя на меди — это, прежде всего, алюминиды меди и зона твердого раствора (рисунок 3). В структуре слоя рентгеноструктурным анализом определяются алюминиды Cu_3Al и Cu_9Al_4 и фаза Al_2O_3 (как результат взаимодействия диффузионного слоя с воздухом).

При насыщении длительностью 2 ч формируется термодиффузионный алюминидный слой толщиной порядка 30 мкм с плавным переходом к основному металлу (см. рисунок 3, а). Диффузионный слой при более высокой длительности насыщения (см. рисунок 3, б) имеет слоистую структуру с ярко выраженной зоной твердого раствора и комплекса алюминидных фаз, твердых растворов на основе соединений Cu_3Al и Cu_9Al_4 .

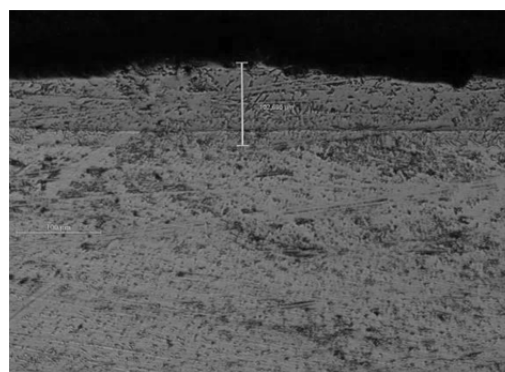
Необходимо отметить, что с точки зрения повышения стойкости достичь высоких защитных свойств для меди удастся при создании слоя толщиной более 50 мкм [10]. В этом случае термодиффузионный слой относительно эффективно защищает медь от окисления.

Как уже отмечалось ранее, образованный диффузионный слой будет являться тепловым сопротивлением, в результате присутствия которого замедлится теплопередача в медном элементе. Теплопроводность диффузионного слоя будет значительно ниже исходной теплопроводности меди, которая составляет 401 Вт / (м · К) при температуре 300 К [11]. Оценка негативного воздействия защитного слоя на теплопроводность представляет собой важную задачу для практического применения медного изделия в теплоотводящих элементах.



× 1 000

а)



× 200

б)

Рисунок 3. — Микроструктура диффузионного слоя на меди, полученного за 2 ч (а) и 6 ч (б) насыщения

На первом этапе исследований проводилась оценка результатов нагрева ламельного элемента в условиях, формирующих нестационарный режим теплообмена (рисунок 4, а). При наличии на поверхности диффузионного слоя скорость нагрева сердцевинки ламельного элемента характеризует эффективность теплопередачи в рассматриваемой системе. До температуры порядка 250...300 °С наблюдался практически линейный прирост температуры в зависимости от времени нагрева. В результате показано, что скорость нагрева для медного образца без диффузионного слоя в указанном интервале температур составляет порядка 6...7 °С / с, а для образцов с термодиффузионным слоем толщиной 50...75 мкм — порядка 2,5...3,0 °С / с, что заметно ниже исходного варианта, не имеющего защитного слоя, скорость нагрева падает практически в 2 раза.

В дальнейшем проводились исследования особенностей нагрева в условиях, формирующих стационарный режим теплообмена (см. рисунок 4, б). Отметим, что за счет принудительного охлаждения противоположного торца ламели на холодном торце достигается более низкая температура. Тепловой баланс устанавливался при температуре в 2...3 раза ниже, чем для варианта, который характеризуется отсутствием принудительного охлаждения. Описываемый вариант эксперимента, имея стационарный режим теплообмена, позволяет по расчетной схеме проводить теплотехнический расчет.

Из ранее проведенных работ [8; 10] отмечено, что коэффициент теплопроводности диффузионного слоя может быть определен в случае равенства тепловых потоков (q) для двух вариантов нагрева, ламели со слоем (q_2) и ламели без диффузионного слоя (q_1):

$$q_1 = q_2; \frac{\Delta t_1}{\frac{b_{\text{осн}}}{\lambda_{\text{осн}} S_{\text{осн}}}} = \frac{\Delta t_2}{\frac{b_{\text{дс}}}{\lambda_{\text{дс}} S_{\text{дс}}} + \frac{b_{\text{осн}}}{\lambda_{\text{осн}} S_{\text{осн}}}}, \quad (1)$$

где Δt_1 и Δt_2 — перепад температур по длине образца без слоя и со слоем соответственно, К;
 $b_{\text{осн}}$ и $b_{\text{дс}}$ — толщина (длина) основного металла (меди) и диффузионного слоя соответственно, м;
 $\lambda_{\text{осн}}$ и $\lambda_{\text{дс}}$ — коэффициент теплопроводности основного металла (меди) и диффузионного слоя соответственно, Вт / (м · К);
 $S_{\text{осн}}$ и $S_{\text{дс}}$ — площадь основного металла (меди) и поперечного сечения диффузионного слоя соответственно, м².

Для решения представленной задачи теплопереноса через ламельный (пластинчатый) элемент и проведения теплотехнического расчета в конкретных числовых значениях проведено упрощение расчетной схемы. Приняли, что направление теплового потока происходит только от торца ламельного элемента, где расположено газовое пламя. Кроме того, все теплопроводящие сечения, а именно сечения слоя и основы по торцу ламельного элемента, приняли равными ($S_{\text{дс}} = S_{\text{осн}}$). В результате контроля температуры с термовизора в месте контакта пламени от газовой горелки с поверхностью ламельного элемента температура в этой зоне составляет порядка 900 К. Такая температура принята в качестве расчетной для определения перепада температур по длине образца.

Необходимо отметить, что при повышении температуры вследствие усиления тепловых неоднородностей рассеивание электронов, коэффициентов теплопроводности металлов изменяется. Поэтому значение коэффициента теплопроводности меди использовалось для соответствующего диапазона температур, в частности для 400 К — 379 Вт / (м · К), для 900 К — 354 Вт / (м · К) [11].

В результате преобразования уравнения (1) и указанных выше допущений коэффициент теплопроводности диффузионного слоя определяется:

$$\lambda_{\text{дс}} = \lambda_{\text{осн}} \left(\frac{b_{\text{дс}}}{b_{\text{осн}}} \right) \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2 - \Delta t_1} \right).$$

Используя данные нагрева медной ламели (пластины), а именно перепады температуры для устоявшегося режима и одинакового временного отрезка (> 80 с), ламелей с различной толщиной слоя, установлено, что интегральный коэффициент теплопроводности термодиффузионного слоя находится в диапазоне $38...54$ Вт / (м · К) (см. рисунок 4, б, таблица 1).

Согласно литературным данным, одним из наилучших вариантов у медных сплавов по теплопроводности является латунь Л96, которая при температуре, сопоставимой с исследуемой, имеет коэффициент теплопроводности, равный 110 Вт / (м · К). Полученные значения коэффициента теплопроводности хорошо коррелируют со значениями коэффициента теплопроводности бронз различного состава, в частности с теплопроводностью алюминиевых бронз, например, при комнатной температуре и концентрации алюминия 10% масс. в меди коэффициент теплопроводности равен $60,8$ Вт / (м · К), а при 20% масс. — уже $29,3$ Вт / (м · К) [11]. Однако следует отметить, что описываемый расчет является лишь приблизительным и не может отражать в полной мере процесс тепломассопереноса, моделируемого испытаниями. Кроме того, сам коэффициент теплопроводности в нашем случае определен для конкретного интервала температур.

Кроме полученных значений коэффициента теплопроводности, наглядно эффективность работы ламельного элемента по теплоотводу может характеризовать разница температур, определенная по контрольным точкам, которые в работе обозначены как «холодные» и «горячие» зоны контроля (рисунок 5). Тогда в количественном выражении можно отметить, что толщина слоя около 30 мкм снижает эффективность теплоотвода на 14% , слой в 100 мкм — на 51% , 120 мкм — на 65% .

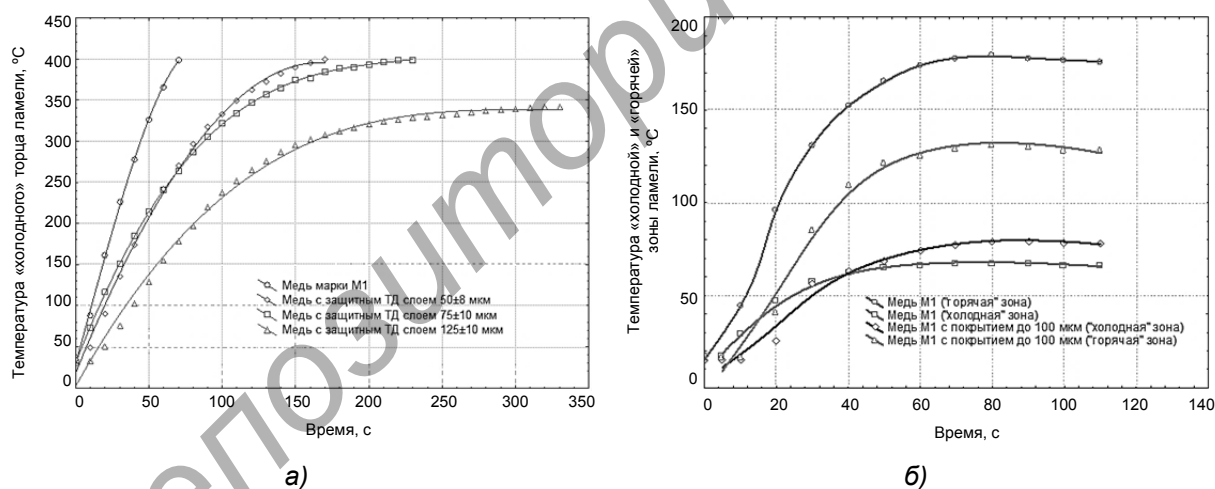


Рисунок 4. — Оценка скорости нагрева пластины (ламели) при нагреве газовым пламенем в нестационарных (а) и стационарных (б) условиях теплообмена

Т а б л и ц а 1. — Значение коэффициента теплопроводности диффузионного слоя в исследуемом интервале температур

Исходные данные			Коэффициент теплопроводности $\lambda_{дс}$, Вт / (м · К) при 900 К
Δt_1 , °K	Δt_2 , °K	$b_{дс}$, мкм	
533	533	0*	354
	528	30 ± 8	54
	521	100 ± 10	45
	516	120 ± 10	38

Примечание. * — для ламели без диффузионного слоя (только медь).

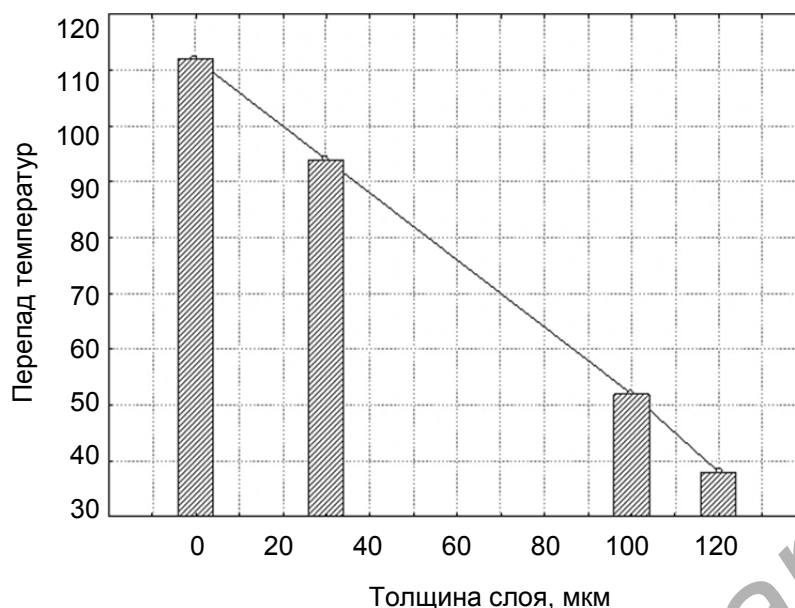


Рисунок 5. — Оценка эффективности теплоотвода в условиях стационарного теплообмена по разности температур в контрольных точках

Заключение. В результате выполненной работы исследованы особенности структур диффузионных слоев на меди марки М1, которые получены из порошковых смесей, обеспечивающих легирование преимущественно алюминием. Приведена структура и фазовый состав образующегося диффузионного слоя разной толщины, полученной после 2 и 6 ч обработки.

Проведен анализ теплофизических свойств термодиффузионных слоев по скорости нагрева в условиях нестационарного теплового поля медного элемента в виде ламели со слоем и без диффузионного слоя. Установлено, что за счет наличия диффузионного слоя происходит снижение скорости нагрева медного элемента, в частности при толщине слоя 50...75 мкм практически в 2 раза.

В результате расчета диффузионного слоя как элемента теплового сопротивления в условиях конвекционного нагрева получены данные по коэффициенту теплопроводности. При толщине диффузионного слоя 100 ± 10 мкм интегральный коэффициент теплопроводности диффузионного слоя составил $45 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$.

Проведена оценка эффективности теплоотвода в условиях стационарного теплового поля ламельного элемента исходя из формирующейся разницы температур по длине элемента со слоем разной толщины и без него. Отмечено, что эффективность теплоотвода в исследуемом диапазоне толщин падает на 14...65 % от исходного варианта без защитного слоя, т. е. технической меди.

Список цитированных источников

1. Вдовин, К. Н. Медный сплав для стенок кристаллизаторов МНЛЗ / К. Н. Вдовин, А. А. Нефедьев // Лит. процессы. — 2011. — № 10. — С. 52—60.
2. Применение медных холодильников в системе испарительного охлаждения на российских доменных печах / К. Шауер [и др.] // Чер. металлы. — 2009. — № 4. — С. 26—30.
3. Преимущества медных теплообменников для отопительных котлов / IEK GROUP // Промышл. АСУ и контроллеры. — 2019. — № 8. — С. 61—63.

4. Клинов, И. Я. Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы : учеб. пособие для механ. специальностей высш. учеб. заведений / И. Я. Клинов. — Изд. 4-е, перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1967. — 468 с.
5. Белоусов, В. В. Высокотемпературное окисление меди / В. В. Белоусов, А. А. Климашин // Успехи химии. — 2013. — Т. 82, № 3. — С. 273—288.
6. Коломыцев, П. Т. Жаростойкие диффузионные покрытия / П. Т. Коломыцев. — М. : Металлургия, 1979. — 272 с.
7. Украинцев, А. Е. Разработка составов и создание на меди диффузионных слоев электродуговой металлизацией с последующей термообработкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / А. Е. Украинцев ; Ин-т металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН. — М., 2010. — 22 с.
8. Константинов, В. М. Исследование особенностей структуры и свойств термодиффузионных жаростойких покрытий на меди / В. М. Константинов, В. Г. Дашкевич, И. В. Плетенев // Литье и металлургия. — 2021. — № 1. — С. 124—129.
9. KME group [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.kme.com/en/>. — Date of access: 14.02.2023.
10. Плетенев, И. В. Анализ теплофизических свойств жаростойких термодиффузионных слоев на меди / И. В. Плетенев, В. Г. Дашкевич // Металлургия : респ. межведомст. сб. науч. тр. / редкол.: И. А. Иванов (гл. ред) [и др.]. — Минск : БНТУ, 2021. — Вып. 42. — С. 249—257.
11. Лариков, Л. Н. Тепловые свойства металлов и сплавов : справочник / Л. Н. Лариков, Ю. Ф. Юрченко. — Киев : Наук. думка, 1985. — 439 с.

Поступила в редакцию 09.03.2023.

УДК 621.926

Л. А. Сиваченко¹, доктор технических наук, доцент,**Л. Л. Сотник**², кандидат технических наук, **М. С. Кузьменкова**³¹Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет», пр-т Мира, 43, 212000 Могилев, Республика Беларусь,
+375 (44) 792 86 83, 228011@mail.ru^{2,3}Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,
225404 Барановичи, Республика Беларусь, ²+375 (29) 803 45 28, Sotnikdin037@gmail.com ,
³+375 (29) 534 63 81, maryiask@yandex.by

К ФОРМИРОВАНИЮ ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ АДАПТИВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕРАБОТКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье показана несомненная практическая актуальность и описаны основные подходы реализации адаптивных методов переработки дисперсных материалов на базе процессов измельчения, диспергирования, смешивания, разделения по крупности, механоактивации, микрогранулирования, дозирования и др. Изложены наиболее характерные направления адаптации рабочего оборудования технологических машин к физико-механическим и реологическим свойствам переработки продуктов. Рассмотрены конкретные варианты практической реализации аппаратов адаптивного действия с использованием новых классифицирующих признаков.

Ключевые слова: адаптивные механизмы; дезинтеграторные технологии; дисперсные материалы; рабочий орган; помол; механоактивация; энергонапряженность.

Рис. 4. Библиогр.: 12 назв.

L. A. Sivachenko¹, DSc in Technical Sciences, Associate Professor,**L. L. Sotnik**², PhD in Technical Sciences, **M. S. Kuzmenkova**³¹Interstate Educational Institution of higher Education "Belarusian-Russian University",

43 Mira Ave., 212000 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (44) 792 86 83, 228011@mail.ru

^{2,3}Institution of Education "Baranavichy State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy,
the Republic of Belarus, ²+375 (29) 803 45 28, Sotnikdin037@gmail.com , ³+375 (29) 534 63 81, maryiask@yandex.by

TO THE FORMATION OF THE ADAPTIVE MECHANISMS TECHNICAL BASE FOR DISPERSED MATERIALS PROCESSING

The undoubted practical relevance is shown and the main approaches to the implementation of adaptive methods of dispersed materials processing based on the processes of grinding, dispersing, mixing, separation by size, mechanical activation, micro granulation, dosing and others are described. The most characteristic directions of the working equipment adaptation of technological machines to the physic-mechanical and rheological properties of products processing are described. Specific variants of the practical implementation of adaptive action devices using new classifying features are considered.

Key words: adaptive mechanisms; disintegrator technologies; dispersed materials; working organ; grinding; mechanical activation; energy stress.

Fig. 4. Ref.: 12 titles.

Введение. Из всего многообразия используемых в промышленности технологий дезинтеграторные являются одними из важнейших. Они включают в себя дробление, помол, в том числе тонкий и сверхтонкий, диспергирование, механоактивацию и механосинтез, классификацию материалов по крупности, уплотнение, гранулирование, механотермическую обработку и целый ряд других процессов. Дезинтеграторные технологии основаны на механизмах разрушения, деформирования, диспергирования и других видах интенсивных

внешних и внутренних воздействий, обеспечивающих управляемое изменение структуры и свойств как отдельных частиц, их конгломератов и дисперсных сред, так и композиционных материалов в целом [1; 2].

Мировые тенденции развития техники убедительно показывают, что дезинтеграторные аппараты из простого орудия труда, обеспечивающего, как правило, одну операцию, превращаются в технологические комплексы, осуществляющие сложную и глубокую переработку материалов. Многообразие используемых машин и еще большее многообразие перерабатываемых продуктов и особенно их свойств требует особых подходов и методов. Магистральный путь к решению этих и многих других задач — создание новых поколений технологических машин, способных оптимизировать весь процесс получения качественных продуктов, начиная с единичных актов воздействий и заканчивая системным управлением всего производственного цикла [3; 4].

Используемое сегодня дезинтеграторное оборудование обладает существенными недостатками и имеет огромный потенциал для развития, а технологии на его основе являются важнейшим фактором энерго- и ресурсосбережения, экологической безопасности и экономической устойчивости. В целом это направление уже в среднесрочной перспективе станет составной частью цивилизационного прогресса в качестве умных машин и технологий [1; 2].

Технические средства, используемые для реализации дезинтеграторных технологий, тем не менее достаточно активно развиваются во всем мире. В качестве примера можно назвать следующие машины и аппараты: центробежно-ударные и конусно-инерционные дробилки, вибрационные, планетарные, струйные, электромагнитные, вихревые, кавитационные и коллоидные мельницы, дезинтеграторы, бисерные аппараты, атриторы, гомогенизаторы, башенные помольные агрегаты и многие другие виды оборудования [5].

Большинство из перечисленных технических средств имеет свои ограниченные области использования и характеризуется существенными недостатками как конструктивного, так и технологического плана, что определяет и задает в настоящее время исходные требования к создаваемым видам оборудования с учетом задач современного материаловедения. Именно эти факторы, а также огромная энергоемкость дезинтеграторных переделов оказывают стимулирующее влияние на разработку новых эффективных конструкций технологических машин [1; 3; 4].

Материалы и методы исследования. Одним из важнейших направлений совершенствования машин для дезинтеграторной переработки материалов является дополнение их рабочего оборудования адаптивным. Основные направления адаптации, которые основаны на механических методах и доступны для практического использования, включают в себя [6; 7]:

- выбор траектории движения, например, по пути наименьшего сопротивления при перемещении в обрабатываемой среде;
- выбор положения в пространстве;
- выбор или подстройка под скорость, ускорение или характер движения;
- резонансная подстройка частоты колебаний или демпферное преобразование энергии внешнего возбуждения колебаний в полезную работу;
- выбор рабочего усилия или силы сопротивления внешнему воздействию;
- изменение кинетической энергии движущегося рабочего органа или рабочего агрегата;
- подстройка по температуре, внешнему давлению, влажности, освещенности, крупности частиц;
- демпфирование внешних воздействий для снижения динамических нагрузок.

Техническая реализация адаптивных методов в дезинтеграторных технологиях содержит дополнительные методологические направления: технологическую вибротехнику, прикладную физико-химическую механику, вариативные механизмы организации и проведения технологических процессов, а также использование аномальных эффектов при их протекании. Перечисленные подходы и методы в максимальной степени положены в основу проектирования новых видов оборудования для дезинтеграторной переработки материалов [7].

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ описанных направлений использования адаптивных механизмов для дезинтеграторной переработки дисперсных материалов позволяет вычлениить те из них, которые могут быть реализованы доступными методами, построенными на известных и собственных исследованиях и разработках [6—8]: кинематическое деформирование рабочих органов; управляемое движение обрабатываемого материала в рабочей камере; кинематика движения рабочих органов; управление контактными взаимодействиями в рабочих зонах.

С учетом описанной методической базы предложены разработанные варианты новых конструкций аппаратов адаптивного действия для комплексной переработки материалов дезинтеграторными способами. Эти конструкции систематизированы с точки зрения функциональных признаков адаптивного воздействия на обрабатываемые материалы. Примеры выполнения некоторых видов технологических аппаратов адаптивного действия приведены ниже. Дадим краткую оценку каждой из представленных конструкций.

На рисунке 1 представлены схемы с кинематическим деформированием рабочих органов [5; 9; 10].

Схема 1. Виброуплотнитель бетонных смесей. В качестве излучателя колебаний, передаваемых в уплотняемую среду, используется цилиндрическая пружина, связанная с генератором колебаний. Направление колебаний совпадает с вектором силы тяжести. Конструкция обладает высокой эффективностью, так как может работать по методу протяжки и кроме уплотнения позволяет непосредственно в процессе укладки производить виброобработку и механоактивацию компонентов бетонной смеси.

Схема 2. Пружинный питатель-дозатор. Транспортирующим звеном устройства является вращающаяся в трубчатом корпусе дугообразно изогнутая пружина, которая обеспечивает равномерную подачу сыпучего материала с одновременным его диспергированием, а при загрузке двух или более компонентов — качественным перемешиванием. Конструктивно отличается простотой и эффективностью работы за счёт совмещения ряда технологических функций.

Схема 3. Смеситель-диспергатор с гибким корпусом. Конструкция выполнена в виде перистальтического пустотелого ротора, который может быть изогнут для образования клиновидных зон между гофрами. Подобная установка способна достаточно эффективно перерабатывать пастообразные продукты и различные другие дисперсные составы и композиции, а также взрывоопасные, токсичные и горючие продукты.

Схема 4. Пружинная мельница. Рабочими органами пружинных мельниц являются установленные в опорах и связанные с приводом вращения дугообразно изогнутые цилиндрические пружины с плотно прижатыми витками в зоне минимального радиуса их изгиба. Процесс измельчения в пружинных мельницах характеризуется высокой интенсивностью и происходит непрерывно в клиновидных пространствах между витками пружин. Область применения пружинных мельниц — тонкий и сверхтонкий помол материала твёрдостью до 5...7 единиц по шкале Мооса, прочностью до 150...200 МПа, механоактивация строительных смесей, приготовление суспензий, эмульсий и паст.



Схема 1



Схема 2

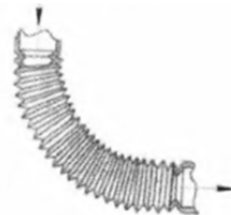


Схема 3



Схема 4

**Рисунок 1. — Адаптивные механизмы
с кинематическим деформированием рабочих органов**

Конструкция механизмов с управляемым движением обрабатываемого материала показана на рисунке 2 [5—7; 11].

Схема 1. Измельчитель с многолезвийным рабочим оборудованием. Рабочее пространство данного измельчителя заполнено набором режущих элементов, включая зубчатые фрезы. Смонтированные на коническом роторе режущие элементы образуют клиновидные рабочие зоны, уменьшающиеся по его высоте. Удаление измельчённого продукта осуществляется в поле центробежных сил через боковые решётки, выполненные в корпусе. Основное назначение данной конструкции — измельчение бутылок из полиэтилентерефталата (ПЭТФ), волокнистых и неоднородных по структуре материалов, а также переработка твёрдых коммунальных отходов, растительного сырья и других подобных материалов.

Схема 2. Рессорно-стержневой измельчитель. Его основное назначение — предварительное измельчение минеральных материалов, механоактивация строительных смесей, селективное дробление горных пород и т. д. Измельчитель содержит установленное на раме в шарнире на опорной стойке подвижное коромысло с вибратором на одном конце и стержневым рабочим оборудованием на другом. Процесс измельчения осуществляется между двумя рядами параллельных между собой рядов дугообразно изогнутых стержней (рессор), причём их нижний ряд неподвижен, а верхний совершает колебательные движения вместе с коромыслом, на котором он закреплён. Измельчение продукта происходит без задержки его в рабочих зонах.

Схема 3. Валковый щеточно-щечковый измельчитель. Повышение эффективности переработки анизотропных и сложных по составу и свойствам материалов обеспечивается совместной работой щеточного вала и подвижной вибрацией щетки, образующей сходящееся серповидное пространство, что способствует активной подаче кусков исходного материала зоны разрушения.

Схема 4. Дробилка молотковая с управляемым движением обрабатываемого материала. Основной отличительной особенностью дробилки следует считать расстановку ударных элементов посекционно с определёнными разрывами между ними и расположенными над ними расширительными зонами. Такое выполнение конструкции позволяет создать управляемый характер движения материала, который после каждого последовательного перехода через секции ударных элементов, попадая в расширительные зоны, теряет свою скорость и поступает на нижерасположенный по уровню ряд ударных элементов с максимальной разницей в скоростях между ними. Итогом такого решения является повышение степени измельчения, улучшение селективности процесса разрушения частиц материала и снижение энергоёмкости.

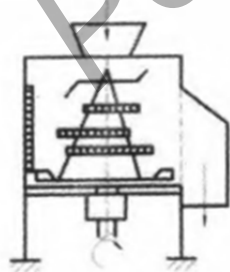


Схема 1

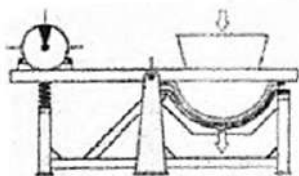


Схема 2

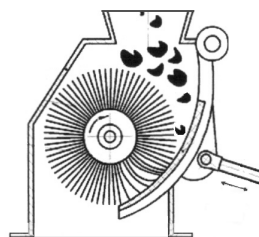


Схема 3

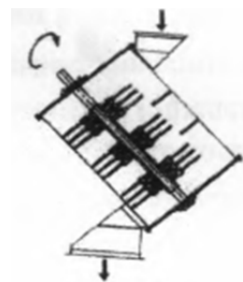


Схема 4

Рисунок 2. — Адаптивные механизмы с управляемым движением материала

Кинематика движения рабочих органов приведена на рисунке 3 [6; 7; 12].

Схема 1. Пружинный грохот. Просеивающей поверхностью грохота являются пружины, связанные с механизмом колебаний. Подлежащий разделению материал загружается в полость пружин, где под действием вибрации мелкая (подрешетная) фракция просыпается через зазоры между витками, а крупная (надрешетная) проходит через нижние отверстия полости пружин, не попадая в зазоры между витками. Граница разделения регулируется изменением зазора между витками и находится в диапазоне 0,2...5,0 мм.

Схема 2. Многоцелевой аппарат с волновой рабочей камерой. Основу конструкции составляет гибкая лоткообразная наклонно установленная оболочка, у которой один борт связан с приводом её колебаний, а второй — с демпфером. Интенсивные перемещения стенок камеры обеспечивают высокую интенсивность процесса переработки находящегося в ней материала. Соответствующее исполнение рабочей камеры (оболочки) позволяет эффективно проводить процессы перемешивания, грохочения, сушки или гранулирования.

Схема 3. Вибровалковый агрегат. Содержит два горизонтальных вала, один из которых совершает вращательное движение, а второй — вибрационные колебания совместно с эксцентриковым валом. Обеспечивает сложное напряженное состояние в разрушаемом слое материала и отличается высокой удельной динамической энергонапряженностью. Может найти применение для селективной переработки минерального сырья, механоактивации, разупрочнения структуры и измельчения особо прочных горных пород.

Схема 4. Цепной агрегат для переработки влажных сырьевых материалов. Конструкция выполнена из набора цепных элементов, соединенных между собой и образующих лоткообразную рабочую камеру, которая своей нижней частью приводится в возвратно-поступательные перемещения. Для интенсификации рабочего процесса цепные элементы могут оснащаться зубьями.

Адаптивные механизмы с управлением контактными взаимодействиями показаны на рисунке 4 [5—7; 9].

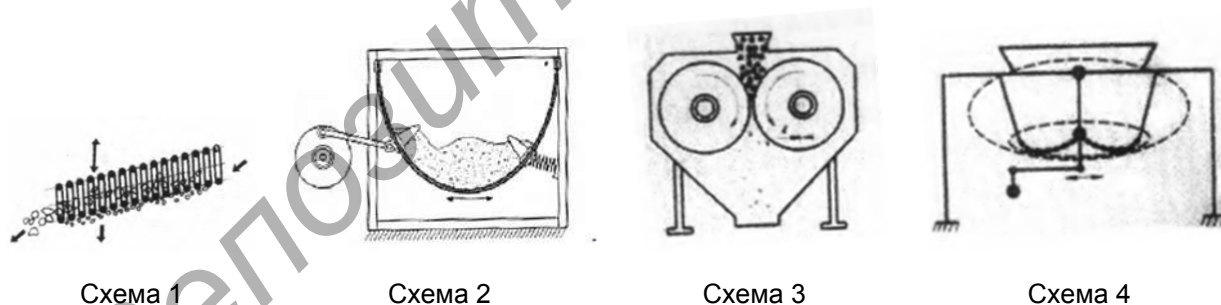


Рисунок 3. — Адаптивные механизмы с кинематикой движения рабочих органов

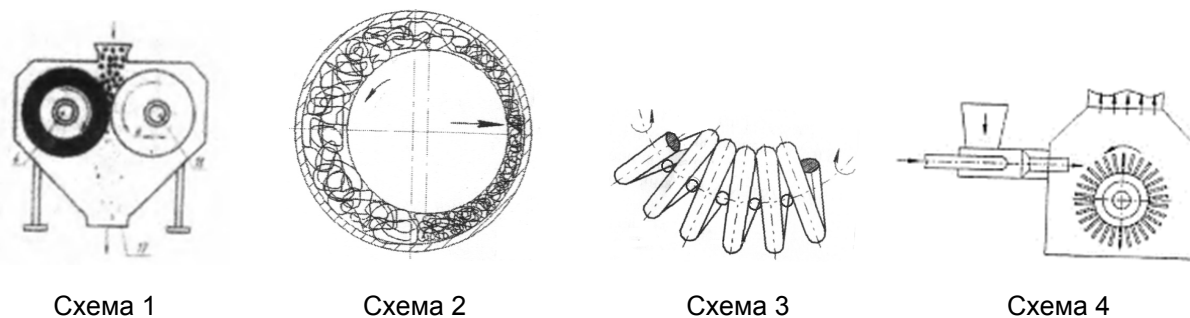


Рисунок 4. — Адаптивные механизмы с управлением контактными взаимодействиями

Схема 1. Иголфрезерный валковый измельчитель (см. рисунок 4). Его рабочий процесс осуществляется между двумя вращающимися навстречу друг другу валками, один из которых выполнен в виде цилиндрической щётки. Подобное решение позволяет интенсифицировать единичные акты разрушения частиц исходного материала и получать готовый продукт с измененными и улучшенными свойствами, например, активировать композиции вяжущих веществ и осуществлять селективное измельчение полезных ископаемых. Иголфрезерные агрегаты отличаются большим конструктивным разнообразием и основываются на использовании металлических щёток, которые в данном случае выполняют принципиально новые технологические функции.

Схема 2. Волоконная мельница. Основой такого оборудования являются наборы тончайших металлических волокон, образующих кольцевую зону измельчения, которая имеет возможность кинематического деформирования для взаимного перемещения волокон относительно друг друга. Процесс помола осуществляется по мокрому способу с принудительной прокачкой мелкодисперсной суспензии через пространство между соприкасающимися волокнами. Предполагается, что такая конструкция позволит получать ультрадисперсные композиции различного назначения.

Схема 3. Пружинная мельница с загрузкой мелкими мелющими телами (шариками). Конструкция позволяет создать максимально возможные контактные напряжения и тем самым повысить энергонапряженность процесса и дисперсность измельченного продукта. Является хорошим механоактиватором и способна производить механосинтез ряда органических и минеральных веществ.

Схема 4. Иголфрезерный струйный аппарат. Принцип действия заключается в разгоне частиц материала газовым потоком до высоких скоростей и подаче через сопло на быстро вращающийся ротор с иголфрезерными насадками. Таким образом суммируется скорость удара, а разрушение частиц происходит не на плоской поверхности, которая релаксирует их кинематическую энергию как за счёт демпферного слоя, так и вследствие устранения эффекта выдувания частиц из рабочей зоны. Аппарат предназначен для тонкого и сверхтонкого помола различных материалов.

Описанные варианты конструкций новых видов разработанного оборудования охватывают наборы единичных аппаратов, которые могут образовывать технологические цепи агрегатов для комплексной переработки сырья и материалов. В каждой из приведенных схем использованы соответствующие механизмы интенсификации рабочих процессов. Представленные конструкции в своем большинстве основаны как на экспериментальных образцах, которые испытаны в лабораторных условиях и показывают высокую технологическую эффективность, так и на аппаратах, которые достаточно широко используются в промышленных условиях.

Предлагаемый перечень технологических аппаратов основан на обобщении предшествующих исследований и наработок в области создания технологических машин адаптивного действия. Резюмируя накопленный потенциал, можно выделить технологические ниши, в которых использование аппаратов адаптивного действия позволит достичь высоких технико-экономических показателей:

- первичное дробление влажных сырьевых материалов, сортировка, камнеудаление и т. д.;
- измельчение ударным способом с получением тонких порошков, селективное дробление, диспергирование, механоактивация, смесеприготовление;
- тонкий и сверхтонкий помол различными способами широкой гаммы продуктов;
- разделение материалов по крупности, в том числе грубое и тонкое грохочение;
- приготовление смесевых композиций для продуктов с любым дисперсным составом;
- механоактивация компонентов строительных материалов, их смесей и других продуктов;
- уплотнение бетонных смесей с форсированной механической обработкой;
- механотермическая обработка материалов путем совместного измельчения и сушки;

- набор аппаратов для пробоподготовки;
- специальное оборудование на основе адаптивных методов воздействия на перерабатываемую среду.

Отдельные виды аппаратов адаптивного действия положены в основу разработки принципиально новых технологических комплексов.

Заключение. Представленные в статье варианты технологического выполнения аппаратов для реализации различных видов дезинтеграторных технологий основаны на адаптивных механизмах воздействия на обрабатываемые материалы. Выбор классифицирующих признаков разделения аппаратов адаптивного действия на отдельные группы базируется на принципиально новой их совокупности, что способствует более качественному анализу рассматриваемого оборудования и выбору максимально эффективных конструкций для практического использования. Описанные методы и средства адаптивных механизмов переработки дисперсных материалов могут быть полезны научно-техническим работникам в качестве справочно-информационной базы.

Список цитированных источников

1. Порошки: получение, свойства, анализ : монография / С. А. Бабенко [и др.] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Томск. политех. ун-т. — Томск : Изд-во Томск. политех. ун-та, 2011. — 264 с.
2. Селективное разрушение минералов / В. И. Ревнивцев [и др.] ; под. ред. В. И. Ревнивцева. — М. : Недра, 1988. — 286 с.
3. Витязь, П. А. Высокие технологии и наноматериалы в строительной индустрии / П. А. Витязь, В. Г. Горбцов // Строит. наука. — 2009. — № 6. — С. 4—16.
4. Вайтехович, П. Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П. Е. Вайтехович. — Минск : БГТУ, 2008. — 220 с.
5. Сиваченко, Л. А. Технический уровень аппаратов для тонкого и сверхтонкого помола материалов и пути их развития / Л. А. Сиваченко, Е. В. Заровчатская, И. М. Дыдышко // Гор. механика и машиностроение. — 2022. — № 2. — С. 57—71.
6. Технологические аппараты адаптивного действия / Л. А. Сиваченко [и др.]. — Минск : Издат. центр БГУ, 2008. — 375 с.
7. 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.
8. Патури, Ф. Растения — гениальные инженеры природы / Ф. Патури ; пер. с нем. Ю. И. Куколева. — М. : Прогресс, 1982. — 271 с.
9. Развитие техники и технологии сверхтонкого помола материалов / Л. А. Сиваченко [и др.] // Инженер-механик. — 2018. — № 4. — С. 6—11.
10. Проблемы, задачи и пути развития пружинных технологических аппаратов / Л. А. Сиваченко [и др.] // Вестн. Баранович. гос. ун-та. Сер. «Технические науки». — 2021. — № 2. — С. 67—77.
11. Сиваченко, Л. А. Энерготехнологические проблемы дезинтеграторных технологий в промышленности строительных материалов и пути их решения / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сиваченко, Н. В. Курочкин // Энергоэффективность. — 2014. — № 12. — С. 22—25.
12. Сотник, Л. Л. Интенсификация процесса дезинтеграции в вибровальковом измельчителе : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Л. Л. Сотник. — Минск, 2022. — 172 л.

Поступила в редакцию 06.02.2023.

УДК 658.512.2

А. Э. Юницкий, В. Н. Гаранин, А. В. КулайЗакрытое акционерное общество «Струнные технологии», ул. Железнодорожная, 33,
220089 Минск, Республика Беларусь, v.garanin@unitsky.com**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭРГОНОМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕРЬЕРА
НА ПРИМЕРЕ РУКОЯТКИ САЛОНА UNIBUS U4-365**

Статья посвящена получению закономерностей влияния эргономических факторов пассажиров на геометрию боковой рукоятки беспилотного рельсового электромобиля на стальных колёсах uST Unibus U4-365 (Unibus). В работе выполнена оценка влияния эргономических факторов на геометрию рукоятки салона Unibus. Изготовлен опытный образец рукоятки с учетом функциональных особенностей элемента интерьера салона электромобиля с его последующей доработкой на основании проведенных функциональных испытаний. Обоснованы отдельные элементы рукоятки с учетом функциональных и антропологических факторов пассажиров. Уделено внимание особенностям элементов рукоятки с разработкой путей дальнейшего совершенствования объекта исследования.

Ключевые слова: транспорт; рукоятка; эргономика; параметр; высота; пассажир; салон.

Рис. 13. Табл. 2. Библиогр.: 11 назв.

A. E. Unitsky, V. N. Garanin, A. V. KulaiUnitsky String Technologies Inc., 33 Zheleznodorozhnaya Str., 220089 Minsk,
the Republic of Belarus, v.garanin@unitsky.com**STUDY OF ERGONOMIC FACTORS INFLUENCE ON GEOMETRIC PARAMETERS
OF INTERIOR ELEMENTS ON THE EXAMPLE OF UNIBUS U4-365 CABIN HANDLE**

The article is devoted to obtaining patterns of the ergonomic factors influence of passengers on the side handle geometry of an unmanned electric rail vehicle on steel wheels uST Unibus U4-365 (Unibus). The research evaluated the influence of ergonomic factors on the geometry of the Unibus cabin handle. A prototype of the handle was made based on the interior element functional features of the electric car interior with its subsequent refinement based on the functional tests carried out. The individual elements of the handle are justified based on passengers functional and anthropological factors. Attention was paid on the handle elements features, along with the development of ways to further improving the object of research.

Key words: transport; handle; ergonomics; parameter; height; passenger; interior.

Fig. 13. Table 2. Ref.: 11 titles.

Введение. Повышение потребительских свойств любого товара является важным фактором, определяющим его стоимость. Использование надёжных деталей и узлов в конструкции, а также различных конструктивных наработок способствуют этому направлению. Не следует исключать здесь и роль промышленного дизайна (далее — ПД), который в значительной степени позволяет улучшать внешний вид товаров и тем самым делает их более востребованными и привлекательными на рынках. В свою очередь ПД как отдельное направление прошёл путь своего исторического развития [1]. Начиная от раннего художественного ремесла и прикладного искусства, пройдя через конструктивизм в технике, художественное конструирование изделий промышленности преобразилось в современный ПД, которым занимаются специальные дизайнерские бюро; их главная задача — с помощью современных методов дизайн-концепций повысить потребительские свойства различных товаров. Согласно

А. Г. Малину, выделяют следующие факторы и концепции ПД: экономические, социокультурные, эргономические и экологические факторы, а также геометрическую, органическую, метафорическую и техноинформационную концепции формы [2].

В данной работе на примере разработки ручки (объекта исследования) для Unibus обращено внимание на эргономические факторы геометрии и места установки рукоятки. Необходимость данных исследований обоснована развитием рельсо-струнного транспорта uST, поскольку ПД способен дополнительно повысить потребительские качества инновационного транспорта и сделать его более привлекательным для потребителей. Следует отметить, что при разработке дизайна любого изделия дизайнер, как творческая личность, зачастую использует интуицию в качестве инструмента, определяющего выбор той или иной концепции или результата. С научной позиции имеется интерес оценить данный выбор с математической точки зрения, тем самым подтвердить интуитивный подход дизайнера математическими формулами и получить в результате более предсказуемый результат.

Материалы и методы исследования. При рассмотрении литературных источников в первую очередь обратим внимание на научные исследования в области ПД, акцентируя внимание на направлениях исследований и решаемых задачах.

ПД как научным направлением занимаются различные учёные. Так, в работе «Опыт дизайн-проектирования промышленного оборудования: к вопросу о стандартизации в промышленном дизайне» предметом исследования является специфика применения принципов стандартизации в проектной практике ПД [3]. В ходе анализа автор обращается как к современным исследованиям в области ПД, так и ставшими классикой работам по теории дизайна, одновременно опираясь в своем исследовании на такие методы, как наблюдение, проектное моделирование, проектно-экспериментальный. Особенность исследования заключается в определении и уточнении места стандартизации в современном ПД, которое сегодня лежит в поле проектирования опыта пользовательского взаимодействия. Результатом применения принципов стандартизации в ходе дизайн-проектирования органов управления и защитных элементов испытательных машин стало комплексное решение таких задач, как обеспечение стилистического единства всего модельного ряда оборудования, эргономика рабочих мест операторов, экономия материальных, человеческих и временных ресурсов.

Помимо изучения влияния принципов стандартизации на дизайн-проектирование, некоторые учёные уделяют внимание роли ПД в повышении конкурентоспособности продукции. Так, в определенном исследовании на примере оценки продукции фирм Philips и Apple, а также производства домашней мебели и прецизионного инструмента показывается, насколько важна интеграция ПД в процесс разработки продукта в повышении конкурентоспособности компании [4]. Основная предпосылка заключается в том, что влияние ПД на деятельность компании не является безусловным, а зависит от развития отрасли и стратегии дизайна. Авторами определён ПД в общем, а именно как деятельность, которая преобразует набор требований к продукту в конфигурацию материалов, элементов и комплектующих. Эта деятельность может повлиять на внешний вид продукта, удобство применения, лёгкость производства, эффективное использование материалов, функциональные характеристики. Главным выводом следует считать то, что при разработке новых продуктов должны учитываться меняющийся характер конкуренции и стратегия дизайна, что в конечном счёте может помочь повысить конкурентоспособность независимо от эволюции отрасли [4].

Использование метода опроса для изучения роли ПД при выборе высокотехнологического продукта (к которому также относится транспорт uST) рассматривается в работе «Промышленный дизайн как фактор конкурентоспособности высокотехнологичных товаров в условиях современного рынка» [5].

В некоторых работах показывается связь типичности и новизны с эстетическими предпочтениями человека [6]. Поскольку типичный продукт редко бывает новым и, наоборот, но-

вый продукт редко называют типичным, положительные эффекты обеих характеристик кажутся несовместимыми. В трёх исследованиях было показано, что типичность (используемая как «хороший пример») и новизна вместе и в равной степени эффективны в объяснении эстетических предпочтений потребительских товаров. Типичность и новизна могут и подавлять друг друга, что является нежелательным. Исследования показали, что люди предпочитают новый дизайн, пока новизна не влияет на типичность, т. е. они предпочитают типичность, если это не в ущерб новизне. По этой причине очень важно сочетание в продукте типичности с новизной, на что и будет уделено основное внимание при разработке рукоятки для Unibus.

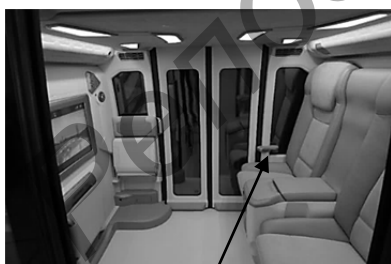
Таким образом, на основании проделанных исследований можно сделать вывод, что ПД уделяется особое внимание при продвижении продуктов на рынки. Отсутствие единых закономерностей доказывает связь большинства факторов и концепций дизайна с культурными ценностями и особенностями людей (в том числе морфологическими). С учетом эргономических факторов использование тех или иных размеров при установке и проектировании объектов салона транспортного средства будет выражаться в основном зависимостью геометрических параметров объекта исследования (в нашем случае рукоятки) от антропологических данных пассажиров, которые будут пользоваться электромобилем Unibus.

Таким образом, в данной работе уделено внимание нахождению теоретических зависимостей геометрии рукоятки и места её установки в Unibus от морфологических (точнее, соматологических) параметров пассажиров рассматриваемого транспорта. Для оценки результатов предполагается сравнить данные, полученные с использованием зависимостей, с практическими результатами монтажа ручки, которые были получены субъективным способом (разработчиком Unibus) до проведения теоретических расчётов, а также с требованиями нормативных документов.

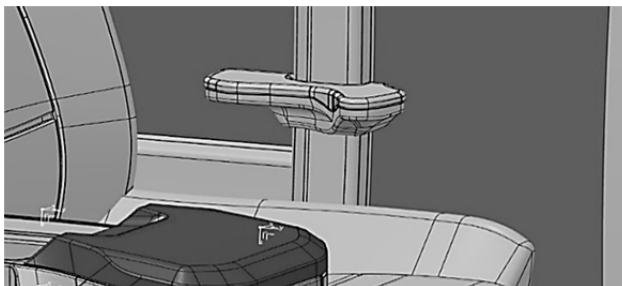
Используемый метод исследования основан на анализе полезных свойств объекта (рукоятки) с обоснованием её геометрических параметров конструкции и монтажа.

Результаты исследования и их обсуждения. К основным техническим требованиям к рукоятке салона электромобиля Unibus следует отнести: возможность монтажа на элементы жёсткости кузова; экологичность; возможность использования пассажиром (при посадке в Unibus, во время движения, а также при вставании с места).

Представим на рисунке 1 первоначальную модель размещения рукоятки в салоне Unibus.



а)



б)

Рисунок 1. — Модель рукоятки в салоне Unibus:
а — место рукоятки в салоне Unibus; б — 3D-модель рукоятки

Представим на рисунке 2 схему размещения пассажира с основными его морфологическими параметрами в двух положениях (сидя и стоя).

Высоту рукоятки от пола Unibus находим по зависимости согласно схеме, представленной на рисунке 2:

$$x = K + EA \cos \varphi - (CD \sin 2\varphi + BC \cos 2\varphi). \quad (1)$$

Зависимость горизонтальных параметров места установки рукоятки определяем исходя из системы уравнений:

$$\begin{cases} y^1 = FE - EA \sin \varphi - (CD \cos 2\varphi - BC \sin 2\varphi) \\ y = EA \sin \varphi + CD \cos 2\varphi - BC \sin 2\varphi - OE \sin \varphi. \end{cases} \quad (2)$$

В данной зависимости принято допущение, что при подъёме с места пассажир наклоняется на угол 2φ .

В целях определения относительных параметров пассажиров были проделаны измерения у 10 лиц (белорусы среднего возраста), средний рост которых составил 185 см. Ниже представлены основные усреднённые соматические параметры исследуемых лиц (потенциальных пассажиров), т. е. при $L^* = 185$ см – $BC = 38$ см, $CD = 29,5$ см, $GF = 51$ см, $OE = 35$ см, $EA = 67$ см, $FE = 51$ см.

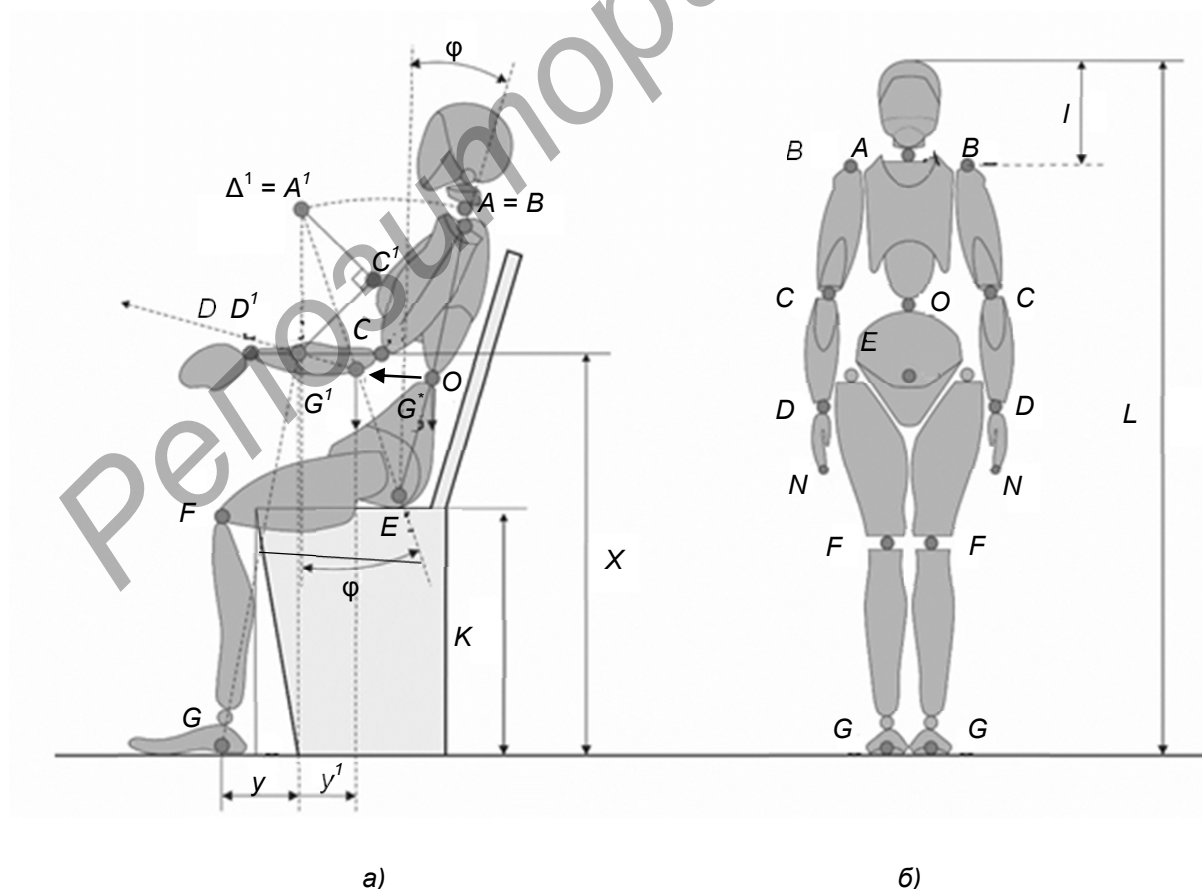


Рисунок 2. — Параметры пассажира:
а — положение сидя; б — положение стоя

Представим вышеуказанные значения в зависимости от роста человека L^* , приняв во внимание одинаковые пропорции тел пассажиров:

$$l = CD = \frac{L^*}{6,5}; \quad BC = \frac{L^*}{4,9}; \quad CD + DN = \frac{L^*}{4,1}; \quad GF = \frac{L^*}{3,7};$$

$$AO = OE = 0,19L^*; \quad K = 0,9FG = 0,24L^*; \quad EA = 0,36L^*; \quad FE = 0,27L^*.$$

На основании нормативных документов средний рост европейца $L^* = 188,1$ см [7; 8]. Подставим значения в вышепредставленные зависимости и получим следующие данные согласно (1) и (2) при $\varphi = 18$ град: $x = 62,1$ см, $y^1 = 29$ см, $y = 10,7$ см.

Ниже представим требования нормативного документа (рисунок 3, таблица 1) [9].

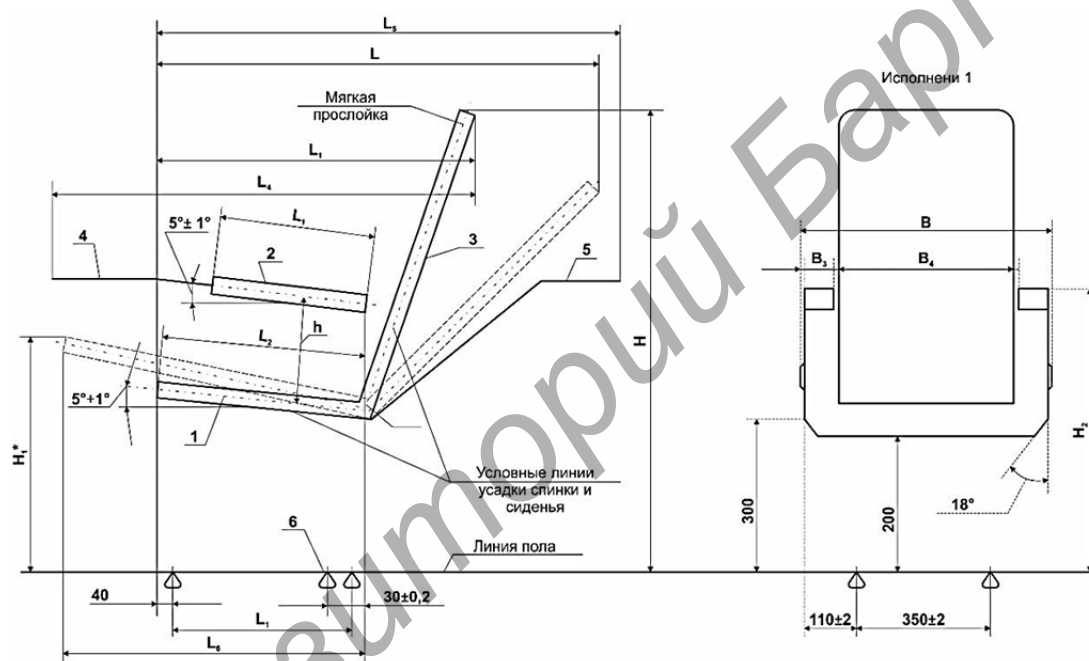


Рисунок 3. — Параметры кресла пассажира [9]

Т а б л и ц а 1. — Требования к креслам [9]

Обозначение размера, мм	Типы кресел			
	1	2	3	4
L , (max)	1 120	950	950	—
L_1 , (max)	800	750	750	600
L_2 , (max)	500	480	470	440
L_3 , (min)	350	350	350	320
L_4 , (max)	1 050	1 000	1 000	—
L_5 , (max)	1 250	1 000	1 000	—
L_6^* , (max)	—	—	760	650
H , (max)	1 140	1 120	1 120	920
H_1^* , (max)	—	—	550	450
H_2 , (max)	610	610	610	560

Окончание таблицы 1

Обозначение размера, мм	Типы кресел			
	1	2	3	4
B , (max)	720	590	—	550
B_1 , (max)	1 480	1 140	1 060	1 060
B_2 , (max)	—	—	1 550	—
B_3 , (min)	70	50	50	50
B_4 , (min)	500	470	440	440
B_5 , (min)	—	70	50	50
B_6	410 ± 2	430 ± 2	430 ± 2	—
h , (min)	180	180	180	180

Сравнивая параметр x с H_2 (см. таблицу 1), можно утверждать, что высота установки рукоятки незначительно выше требований нормативных документов, что указывает на правильность используемых зависимостей.

Сравним полученные данные с результатами известных исследований (таблица 2) [10].

Обратим внимание на субъективные предпочтения дизайнера Unibus по установке рукоятки в салоне транспорта (рисунок 4), который имеет рост 188 см, и представим результаты на рисунке 5.

При монтаже рукоятки в салоне Unibus были выдержаны размеры, которые представлены на рисунке 5.

Т а б л и ц а 2. — Сравнительные данные размеров x и y^1

Показатель, см	Расчётные параметры, см	Источник [9]	Источник [10]
x	62,1	68	61
y^1	29	26	> 4



Рисунок 4. — Фотография установки рукоятки в салоне Unibus

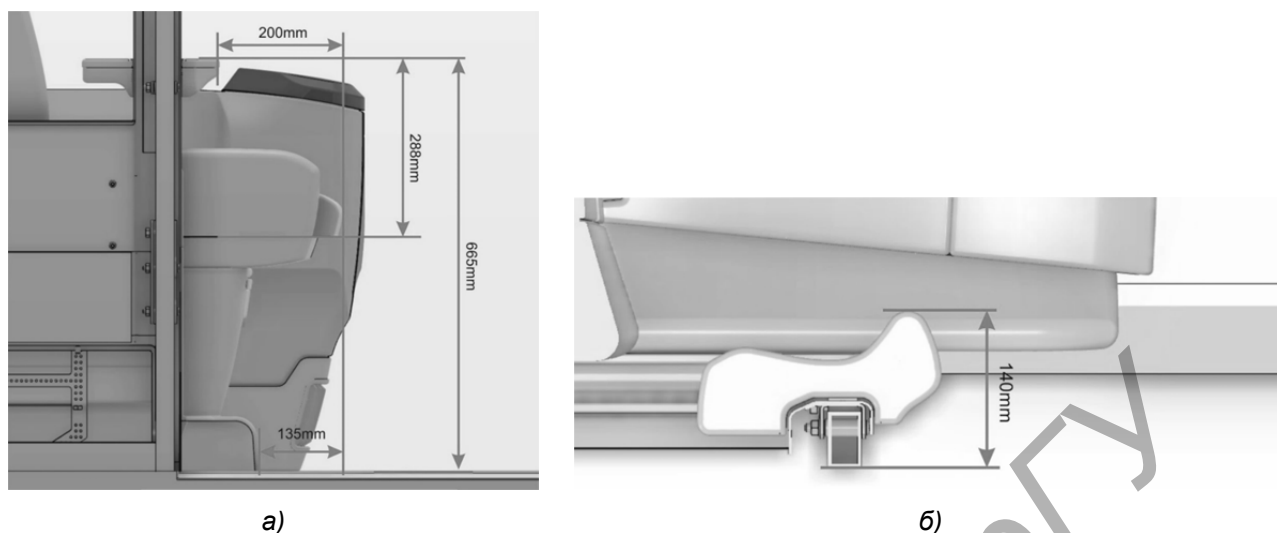


**Рисунок 5. — Параметры установки рукоятки в салоне:
а — вид сбоку; б — вид сверху**

Сравнивая теоретические данные с результатом опытно-промышленной установки рукоятки на Unibus, можно утверждать, что предлагаемые в данной работе зависимости указывают на возможность их применения, поскольку полученные данные незначительно отличаются от параметров установки рукоятки.

На основании схемы, представленной на рисунке 2, усилие F , которое должен развить пассажир при вставании с места, определяется по зависимости

$$F = \frac{G^1 y}{x}, \quad (3)$$

где G^1 — это часть веса пассажира, которую при подъёме он преодолевает усилием руки, Н.

На основании данных, полученных при исследовании 10 лиц, средний вес пассажиров составил $G^* = 800$ Н. Учитывая, что рукоятка находится с одной стороны, принимаем допущение — 50 % веса может быть «перенесено» при подъёме на рукоятку, т. е. $G^1 = 400$ Н. Подставим полученные значения в (3) и получим $F = 69,0$ Н.

Допустимое усилие на органы управления рукой для человека не должны превышать 80 Н, что указывает на правильность предлагаемых зависимостей [11].

На основании вышепредставленной информации теоретическим методом обосновано место установки рукоятки в салоне в зависимости от среднего роста пассажиров.

Следующим этапом работы является обоснование основных геометрических параметров рукоятки. Представим предварительный вид рукоятки с указанием основных точек опоры (рисунок 6). Из схемы следует выделить следующие части рукоятки исходя из её функциональности и антропологических факторов: место захвата рукой при посадке; место расположения кисти при движении электромобиля (стационарное место расположения кисти от точки D); точка опоры при вставании с места (точка D^1); зона расположения руки пассажира во время движения.

На основании морфологических параметров руки человека (рисунок 7) выделим основной параметр Φ_5 , который в среднем составляет 120 мм [7]. Диаметр нижней части руки определяется умножением на 1,25 ширины кисти руки, т. е. $1,25 \cdot 120 = 150$ мм [8].

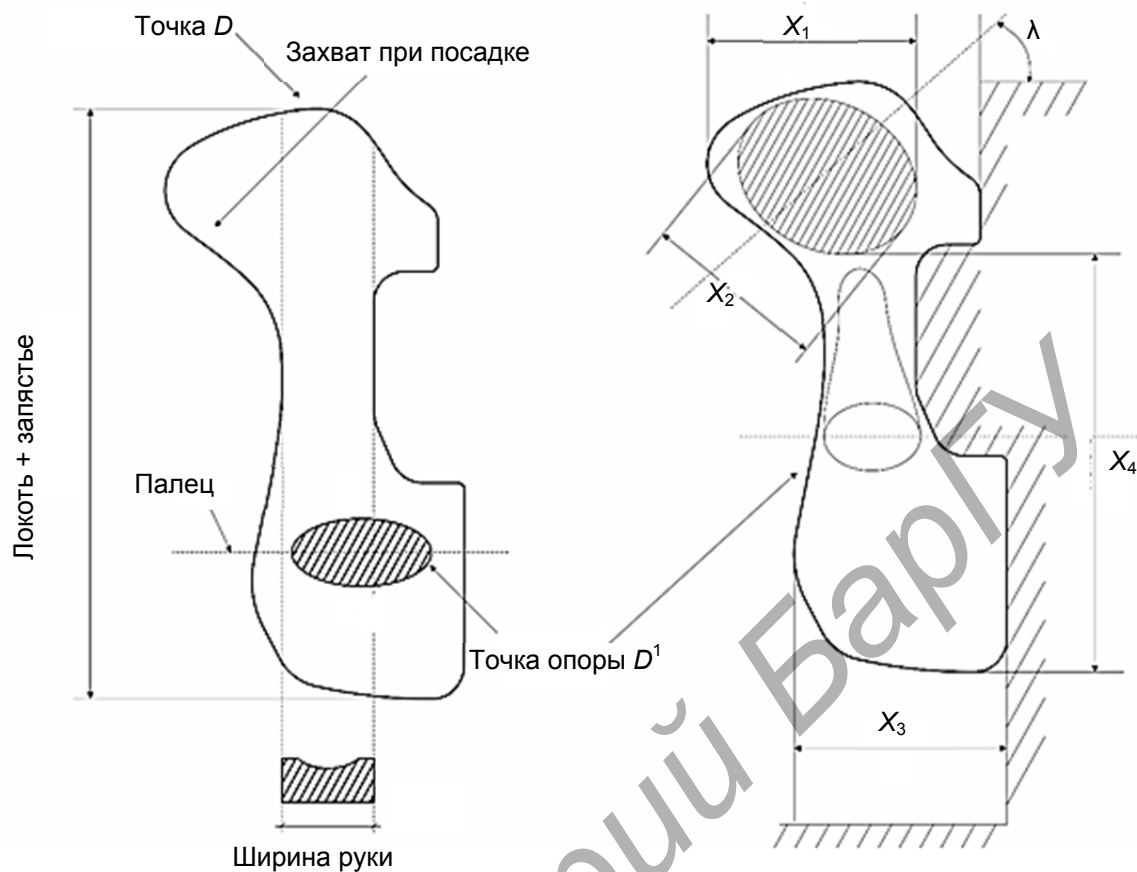


Рисунок 6. — Эскиз рукоятки

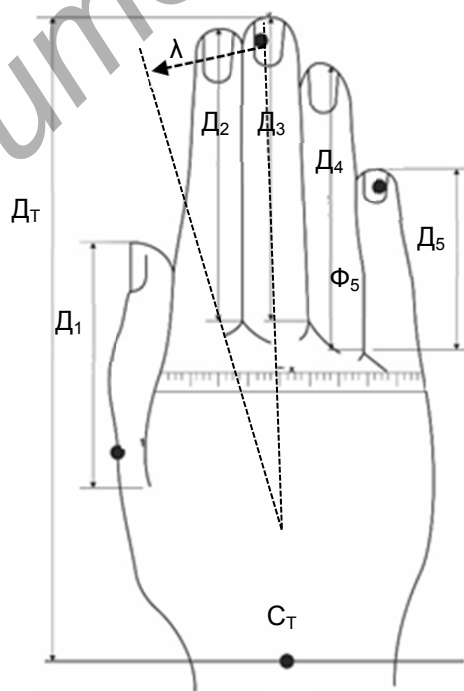


Рисунок 7. — Морфологические параметры руки человека [8]

Конструкцию рукоятки в месте её захвата при посадке определяем исходя из угла поворота кисти руки λ (10 град), а также ширины кисти (120 мм) (рисунок 8).

Угол наклона места расположения кисти от точки D определим исходя из угла λ (в целях минимального выделения при открытых дверях), а также угла поворота кисти руки (рисунок 9).

Площадка опоры при вставании с места (точка D^1) характеризуется удобством захвата, а также прочностными параметрами, поскольку на основании вышепредставленной зависимости место должно выдерживать минимальную нагрузку в 69 Н (рисунок 10, а).

Площадь рукоятки для расположения руки в состоянии покоя будет определяться диаметром нижней части руки (с.м. рисунок 10, б) [7].

С учётом отсутствия острых углов, а также на основании принятых выше параметров представим чертёж рукоятки для салона Unibus (рисунок 11) и её общий вид (рисунок 12).

Дальнейшим шагом развития ПД в данном направлении следует считать изучение других факторов и концепций (органическую, метафорическую, техно-информационную), влияющих на совершенство изделия (рукоятки), обладающего в конечном счёте повышенными потребительскими качествами (рисунок 13).



Рисунок 8. — Место захвата рукоятки при посадке

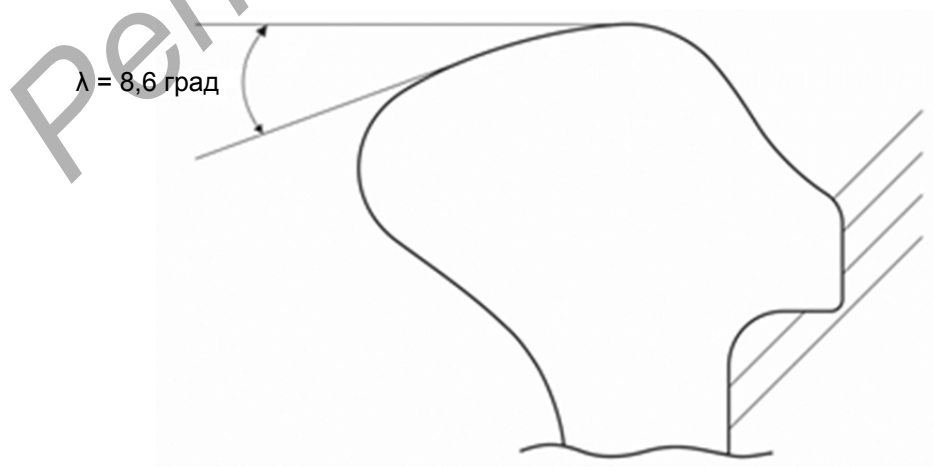


Рисунок 9. — Проектирование стационарного места расположения кисти

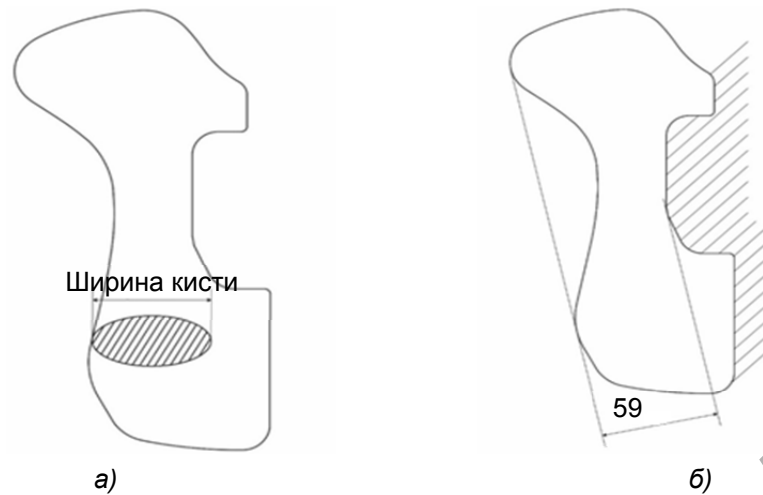


Рисунок 10. — Площадка опоры рукоятки: а — площадка опоры при вставании с места; б — место расположения руки в состоянии покоя

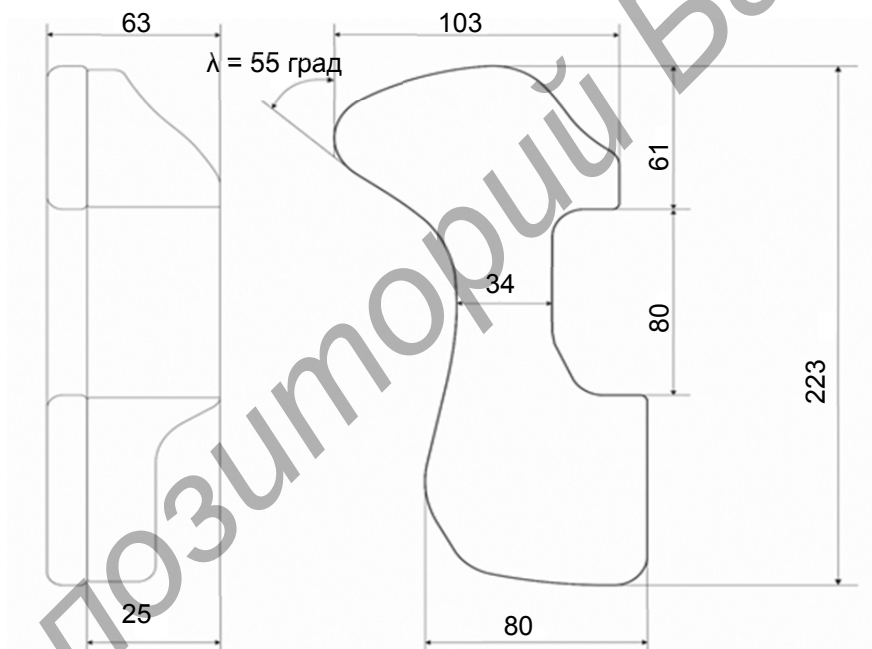


Рисунок 11. — Чертёж рукоятки салона Unibus

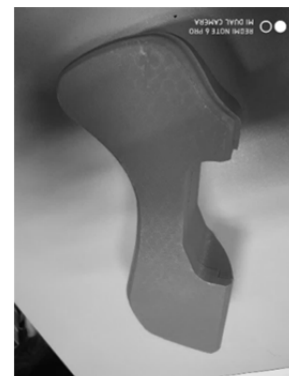


Рисунок 12. — Общий вид образца рукоятки салона Unibus



Рисунок 13. — Использование электромобиля uST с повышенными потребительскими качествами

Заключение. Проведенные работы позволили установить закономерности влияния роста пассажиров L на расположение рукоятки в салоне городского пассажирского электромобиля Unibus.

Также установлены закономерности влияния параметров кисти рук пассажиров на основные геометрические параметры рукоятки.

Следует отметить, что представленная методика позволяет обосновать геометрию элементов пассажирского салона с точки зрения эргономики без субъективной оценки дизайнера, а также упростить требования к дизайну и, как результат, удешевить процесс проектирования без ущерба качества ПД.

На основании полученной модели, учитывающей соматические особенности строения человека того или иного региона, можно оценить место установки рукоятки или возможность её переустановки/регулировки под конкретных пользователей.

Список цитированных источников

1. Барташевич, А. А. Основы художественного конструирования : учеб. для втузов / А. А. Барташевич. — Минск : Выш. шк., 1984. — 224 с.
2. Малин, А. Г. Теория и методология дизайна : конспект лекций / А. Г. Малин, И. М. Ушкина, И. С. Гурко. — Витебск : Витеб. гос. техн. ун-т, 2014. — 80 с.
3. Опыт дизайн-проектирования промышленного оборудования: к вопросу о стандартизации в промышленном дизайне (на материале проекта модернизации испытательного оборудования индийской компании BiSS) // Человек и культура. — 2020. — № 1. — С. 161—184.
4. How integrating industrial design in the product development process impacts on company performance [Электронный ресурс]. — Mode of access: [https://sci-hub.se/10.1016/s0737-6782\(00\)00069-2](https://sci-hub.se/10.1016/s0737-6782(00)00069-2). — Date of access: 09.03.2023.
5. Промышленный дизайн как фактор конкурентоспособности высокотехнологичных товаров в условиях современного рынка [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/promyshlennyy-dizayn-kak-faktor-konkurentosposobnosti-vysokotekhnologichnyh-tovarov-v-usloviyah-sovremennogo-rynka/viewer>. — Дата доступа: 09.03.2023.
6. Hekkert, P. Most advanced, yet acceptable: Typicality and novelty as joint predictors of aesthetic preference in industrial design / P. Hekkert, D. Snelders and P. C. W. van Wieringen // British J. of Psychology. — 2003. — № 94. — P. 111—124.
7. Безопасность машин. Размеры тела человека : ГОСТ Р ЕН 547-3-2009. — Введ. 14.12.2009. — М. : Стандартинформ, 2011. — 12 с.
8. Эргономика. Основные антропометрические измерения для технического проектирования. : ГОСТ Р ИСО 7250-1-2013. — Введ. 17.12.2013. — М. : Стандартинформ, 2014. — Ч. 1 : Определения и основные антропометрические точки. — 41 с.
9. Кресла пассажирские, авиационные. Типы. Основные параметры и размеры. Технические требования : ГОСТ 23079-78. — Введ. 01.01.1979. — М. : Госстандарт, 1978. — 9 с.
10. Möbelinstitutet och Möbelfakta 2.0 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://svenskform.se/175aravsvenskform/mobelinstitutet-och-mobelfakta-2-0/>. — Дата доступа: 09.03.2023.
11. Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие эргономические требования : ГОСТ 12.2.049-80. — Введ. 01.01.1982. — М. : Госстандарт, 1980. — 15 с.

Поступила в редакцию 21.03.2023.

УДК 637.116.2

С. Н. Бондарев, А. В. Китун, доктор технических наук, профессор

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 899 80 92, seregabondarev1991@yandex.ru

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ДОИЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Целью данной работы является анализ результатов исследований по совершенствованию доильных аппаратов. Новизна работы заключается в обосновании перспективного направления усовершенствования доильного аппарата для коров.

Введение содержит краткую характеристику молочной отрасли страны и анализ энергоёмкости производства молока в сравнении с лучшими мировыми производителями. В основной части представлены поисковые исследования в области усовершенствования конструкции доильных аппаратов для коров.

Установлено, что нерешенной и малоизученной остается проблема повышения величины вакуумметрического давления при разжатии стенок сосковой резины (переход к такту «сосание»), приводящая к реверсивному движению молока в доильном аппарате и повышению затрат энергии на процесс машинного доения. Исключение повышения вакуумметрического давления в подсосковой камере доильного стакана при разжатии стенок сосковой резины позволит устранить реверсивное движение молока в доильном аппарате и снизить энергоёмкость процесса машинного доения на 15,3 %.

Результаты исследований будут полезны при разработке конструкций доильных аппаратов для выбора наиболее энергоэффективных параметров работы с учетом интенсивности молокоотдачи животного.

Ключевые слова: доильный аппарат; молоко; сосковая резина; молокоотдача; энергоёмкость; вакуум.

Рис. 7. Библиогр.: 14 назв.

S. N. Bondarev, A. V. Kitun, DSc in Technical Sciences, Professor

Institution of Education “Belarusian State Agrarian Technical University”, 99 Nezavisimosti Ave.,
220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (29) 899 80 92, seregabondarev1991@yandex.ru

ANALYSIS OF RESEARCH RESULTS ON THE IMPROVEMENT OF MILKING MACHINES

The purpose of this work is to analyze the results of research on the improvement of milking machines. The novelty of the work lies in the substantiation of a promising direction for improving the milking machine for cows.

The introduction contains a brief description of the country's dairy industry and the analysis of the energy intensity of milk production in comparison with the world's best producers. The main part presents exploratory research in the field of improving the design of milking machines for cows.

It is established that the problem of the vacuum pressure value increasing when the walls of the nipple rubber are decompressed (transition to the “sucking” cycle), leading to a reversible movement of milk in the milking machine and an increase in energy costs for the process of machine milking remains unresolved and little studied. Eliminating the increase in vacuum pressure in the suction chamber of the milking cup when the walls of the nipple rubber are unclenched, will exclude the reverse movement of milk in the milking machine and reduce the energy intensity of the machine milking process by 15,3 %.

The results of the research will be useful in the development of milking machine designs for selecting the most energy-efficient operation parameters, taking into account the intensity of the animal's milk output.

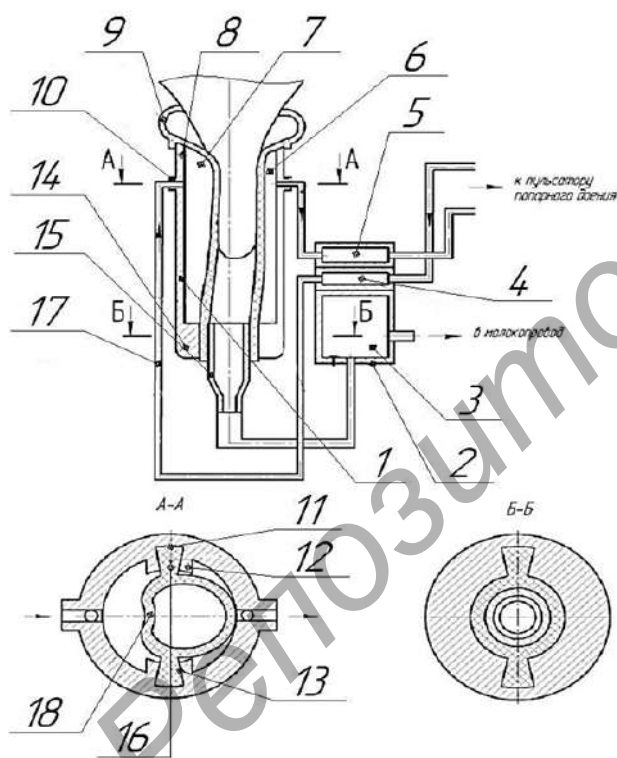
Key words: milking machine; milk; nipple rubber; milk output; energy intensity; vacuum.

Fig. 7. Ref.: 14 titles.

Введение. За 2021 год в Беларуси было произведено порядка 7,8 млн тонн молока, 4 млн тонн из которых была поставлена на экспорт, а выручка составила 2,7 млрд долларов США [1; 2], но основным рынком сбыта молочной продукции является Российская Федерация, на долю которой приходится около 74,4 % всего экспорта [3].

Несмотря на значительные успехи отечественной молочной отрасли, ей также присущ ряд недостатков, к которым можно отнести низкую конкурентоспособность отечественной молочной продукции по причине высоких удельных затрат на производство молока и его невысокого качества в сравнении с мировыми лидерами по экспорту молочной продукции: странами ЕС, Новой Зеландии и США. Так, для производства одной тонны отечественного молока затрачивается порядка 80...100 кВт · ч / т, в то же время в странах ЕС данный показатель находится в интервале 40...60 кВт · ч / т [4; 5]. Качество производимого молока также уступает мировым лидерам. Так, за 2021 год доля произведенного отечественного молока сорта экстра составила 62,2 %, в то время как у лучших мировых производителей данный показатель составляет порядка 70 % [4].

Одной из причин высоких удельных затрат на производство молока и снижения продуктивности коров является несовершенство доильных аппаратов. Для поиска путей решения этой проблемы необходимо проанализировать известные типы доильных аппаратов.



1 — доильные стаканы; 2 — коллектор; 3 — молочная камера; 4, 5 — распределительные камеры; 6, 7 — межстенные камеры; 8 — гильза; 9 — сосковая трубка; 10, 11 — воздушные патрубки; 12 — продольные выступы; 13 — трапециевидальные проточки; 14 — утолщенный бурт; 15 — смотровой конус; 16 — трапециевидальные ребра; 17 — шланги; 18 — вогнутые участки, копирующие положение языка теленка в момент отсасывания молока; 19 — подсосковая камера

Рисунок 1. — Схема доильного аппарата непрерывного действия с односторонним сжатием соска

Материалы и методы исследования.

Доильные аппараты по характеру силы, используемой для извлечения молока, бывают выжимающие и отсасывающие.

При доении выжимающим доильным аппаратом извлечение молока достигается за счет выжимания соска вымени коровы [6]. Преимущество выжимающих доильных аппаратов заключается в имитации ручного доения, что позволяет избежать травмирующего воздействия высокого уровня вакуума на сосок вымени коровы в подсосковой камере доильного стакана [6; 7].

В научных работах Д. И. Ялового предложена конструкция доильного аппарата непрерывного доения выжимающего принципа действия с односторонним сжатием соска вымени коровы (рисунок 1) [8].

Недостатком рассматриваемого доильного аппарата является сложность его конструкции и работы. Одностороннее сжатие сосковой резины не обеспечивает полноценный массаж и стимуляцию кровообращения соска вымени коровы по всей его длине и диаметру, что приводит к торможению рефлексов молокоотдачи, а следовательно, снижению его молочной продуктивности.

Так как в рассматриваемом доильном аппарате (см. рисунок 1) происходит одностороннее сжатие соска коровы, автор предложил формулу по определению давления, необходимого для одностороннего сжатия соска [7]:

$$P_c = k \left[y \left(\frac{L_1}{2} \right) + b_1 \left(\frac{P_H}{2E\pi(R_2^2 - R_1^2)} + \frac{1}{2L_1} \int_0^{L_1} \sqrt{1 + y'(x)^2} dx - 0,5 \right) \right], \quad (1)$$

где k — погонный коэффициент постели соска;

y — величина прогиба стенки сосковой резины, м;

L_1 — длина сосковой резины в рабочем положении, м;

b_1 — толщина стенки сосковой резины, м;

P_H — наружное давление, оказываемое на сосковую резину, Па;

E — модуль упругости сосковой резины, Па;

R_2 — наружный радиус сосковой резины, м;

R_1 — внутренний радиус сосковой резины, м;

x — удлинение сосковой резины, м.

Проанализировав формулу (1), установили, что давление, необходимое для одностороннего сжатия соска вымени животного, зависит от величины наружного давления и конструктивных параметров сосковой резины.

В зависимости от одностороннего сжатия под действием давления P_c происходил прогиб стенки сосковой резины при одностороннем сжатии:

$$w_0 = b_1 \left(\frac{P_H}{2E\pi(R_2^2 - R_1^2)} + \frac{1}{2L_1} \int_0^{L_1} \sqrt{1 + y'(x)^2} dx - 0,5 \right). \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что прогиб стенки сосковой резины при одностороннем сжатии зависит от величины наружного давления, толщины стенки сосковой резины, ее радиуса и длины.

В исследованиях С. И. Щукина предлагается использование сосковой резины с переменной толщиной стенки (рисунок 2) [9].

По причине разной величины деформации стенок сосковой резины к недостаткам рассматриваемой конструкции сосковой резины можно отнести неравномерное массирующее воздействие на сосок по его длине. Кроме того, в местах утончения стенок сосковой резины ввиду меньшей ее жесткости возрастает вероятность ее разрыва под действием внешнего давления и натяжения.

Созданием доильного аппарата, безвредного для здоровья коровы, занимался В. П. Скворцов. Предложенный автором доильный стакан с сосковой резиной снабжен дополнительно оболочкой и лепестковым деформатором (рисунок 3) [10].

Для определения величины поперечной деформации любой точки стенки сосковой резины в доильном стакане с лепестковым деформатором В. П. Скворцов предложил следующую формулу [10]:

$$w = \frac{P}{2\pi m E e} [\varphi(x) + \varphi(x) - 1], \quad (3)$$

где $\varphi(x)$ — функция независимой переменной для учета влияния краев оболочки;

m — число Пуассона для резины.

Анализ формулы (3) показывает, что величина прогиба стенки сосковой резины доильного аппарата зависит от величины вакуума в доильном аппарате и физико-механических свойств сосковой резины.

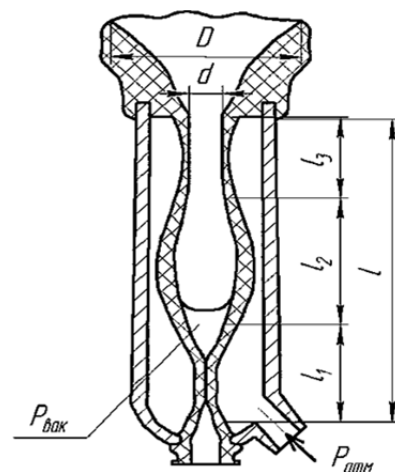
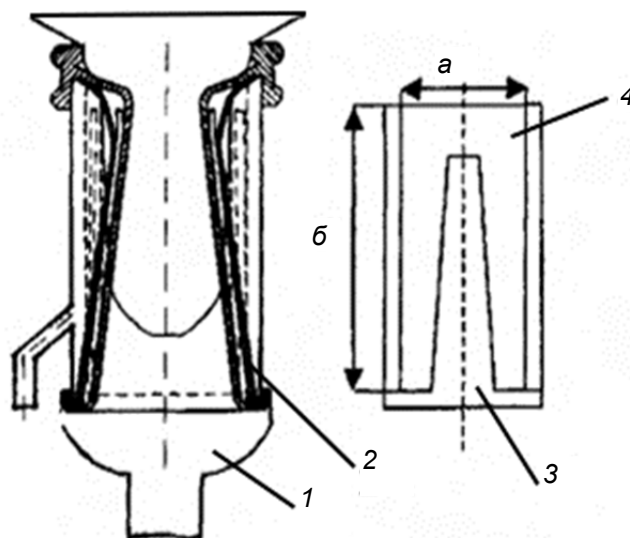


Рисунок 2. — Доильный стакан с сосковой резиной переменной толщины



a — внутренний диаметр сосковой резины с лепестковым деформатором; b — длина сосковой резины с лепестковым деформатором;

1 — доильный стакан с лепестковым деформатором; 2 — дополнительная оболочка; 3 — лепестковый деформатор; 4 — сосковая резина

Рисунок 3. — Доильный стакан с дополнительной оболочкой и лепестковым деформатором

Рассматриваемая конструкция доильного стакана является сложной в изготовлении и обслуживании.

Кроме того, использование предложенного доильного аппарата при машинном доении коров повлечет дополнительные затраты энергии на привод деформатора и создание давления, при котором сосковая резина с дополнительной оболочкой будут сжимать и деформировать сосок вымени коровы.

З. В. Макаровская предложила доильный стакан, который в процессе работы имитировал бы движения ротовой полости теленка (рисунок 4) [11].

При анализе конструкции предложенного доильного стакана было установлено, что его недостатком являются дополнительные затраты энергии на привод амортизатора.

Таким образом, установлено, что выжимающие доильные аппараты сложны по конструкции и увеличивают время доения коровы, что ведет к снижению надоев молока и, соответственно, повышает энергоемкость процесса машинного доения.

Отсасывающие доильные аппараты получили наибольшее распространение за счет своей простоты конструкции, удобства в обслуживании и ремонте. Общими деталями таких доильных аппаратов являются (рисунок 5):

- пульсатор 1, необходимый для преобразования постоянного вакуума в переменный, а также смены тактов работы доильного аппарата;
- вакуумпровод 2 и молокопровод 3;
- доильное ведро 4, необходимое для сбора выдоенного молока;
- доильные стаканы 5, которые в процессе машинного доения одеваются на соски вымени животного и напрямую контактируют с выменем, оказывая на него механическое воздействие;
- коллектор 6, предназначенный для сбора молока от доильных стаканов и распределения переменного вакуума по межстенным камерам доильных стаканов.

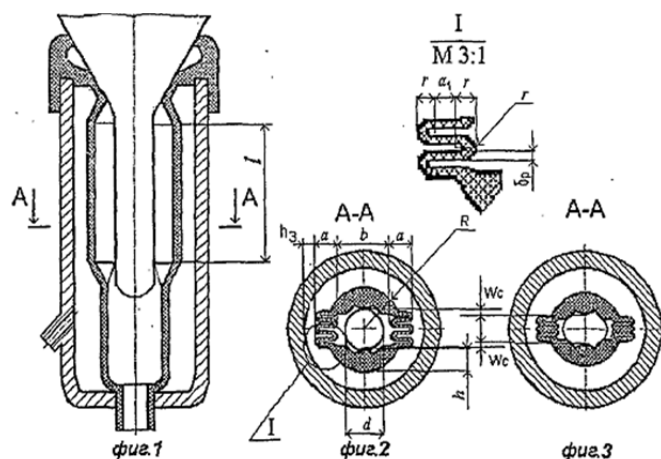


Рисунок 4. — Доильный стакан, имитирующий ротовую полость теленка

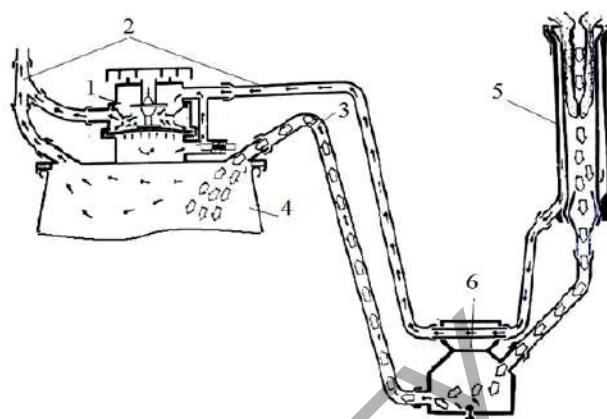
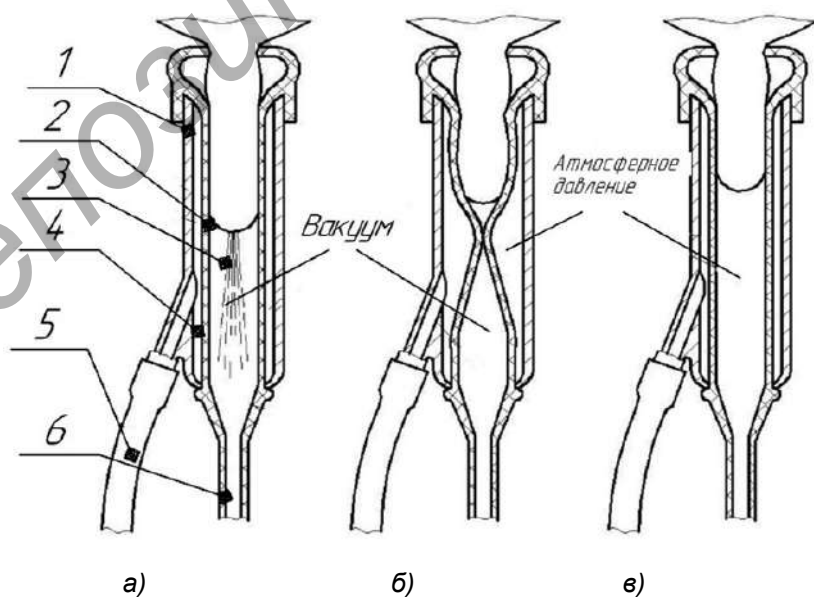


Рисунок 5. — Схема работы доильного аппарата

Принцип работы таких доильных аппаратов (рисунок 6) основан на создании вакуумметрического давления в камерах доильных стаканов и чередовании тактов работы, в зависимости от количества которых доильные аппараты бывают [12]:

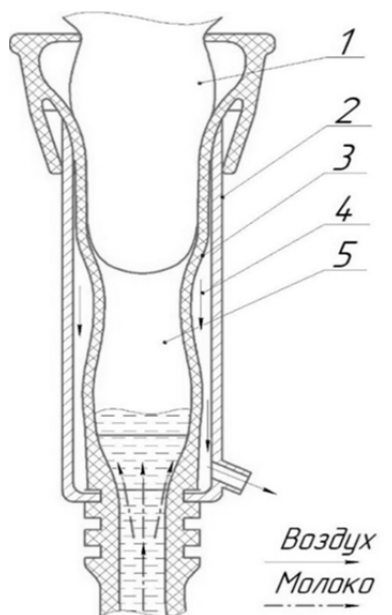
- двухтактные — процесс работы основан на чередовании двух тактов — «сосание» и «сжатие»;
- трехтактные — процесс работы протекает по тактам «сосание», «сжатие» и «отдых»;
- четырехтактные — работают по принципу чередования тактов «сосание», «сжатие», «сосание», «отдых».

При работе доильного аппарата, независимо от числа тактов, во время такта «сосание» (см. рисунок 6, а) в межстенной 4 и подсосковой 3 камерах доильного стакана создается вакуум, за счет разности давлений между подсосковой камерой и соском вымени животного извлекается молоко, которое в дальнейшем транспортируется по молочной трубке 6 в коллектор.



1 — гильза доильного стакана; 2 — сосковая резина; 3 — подсосковая камера; 4 — межстенная камера; 5 — вакуумный шланг; 6 — молочная трубка

Рисунок 6. — Схема и процесс работы доильного стакана:
а — такт «сосание»; б — такт «сжатие»; в — такт «отдых»



- 1 — сосок вымени коровы;
2 — гильза доильного стакана;
3 — присосок сосковой резины;
4 — межстенная камера доильного стакана; 5 — подсосковая камера доильного стакана

Рисунок 7. — Доильный стакан при переходе от такта «сжатие» к такту «сосание»

При такте «сжатие» в межстенную камеру 4 (см. рисунок 6, б) поступает воздух, в результате за счет разности вакуумметрического давления в подсосковой 3 и атмосферного в межстенной 4 камерах стенки сосковой резины 2 прогибаются и сжимают сосок вымени коровы, что способствует стимулированию в нем кровообращения и предотвращению застоя крови.

С наступлением такта «отдых» (см. рисунок 6, в) воздух поступает в межстенную 4 и подсосковую 3 камеры, что способствует отдыху соска вымени коровы от травмирующего воздействия вакуума и нормализации кровообращения.

В момент откачки воздуха из межстенной 4 и подсосковой 5 камер доильного стакана (рисунок 7) происходит разжатие стенок сосковой резины и резкое увеличение объема подсосковой камеры 5 доильного стакана, приводящее к скачкообразному повышению в ней вакуумметрического давления, в результате чего выдоенное молоко из коллектора реверсивным движением обратно перемещается в подсосковую камеру доильного стакана.

Для эвакуации молока обратно из подсосковой камеры в коллектор и далее в молокопровод дополнительно затрачивается энергия [13].

Результаты исследования и их обсуждение. По предварительным расчетам установлено, что при величине вакуумметрического давления $p_v = 43$ кПа, частоте пульсаций $\chi_n = 60$ мин⁻¹ и разовом удое $m_p = 8,7$ кг от коровы энергоемкость процесса машинного доения с учетом реверсивного движения молока в двух-, трех- и четырехтактных доильных аппаратах составит 3,128 и 3,738 кВт · ч / т соответственно [14].

Если исключить повышение вакуумметрического давления в подсосковой камере доильного стакана при разжатии стенок сосковой резины в момент начала такта «сосание», то будет устранено реверсивное движение молока в доильном аппарате. Устранение данного негативного фактора при величине вакуума в доильном аппарате $p_v = 43$ кПа, частоте пульсаций $\chi_n = 60$ мин⁻¹, соотношении тактов «сосание»/«сжатие» 60/40 и разовом удое $m_p = 8,7$ кг от коровы снизит энергоемкость процесса машинного доения на 15,3 % [14].

Заключение. Проводимые ранее исследования направлены на усовершенствование конструкции доильного стакана в целях снижения травмирующего механического воздействия доильного аппарата на вымя коровы в процессе машинного доения.

Нерешенной и малоизученной остается проблема повышения величины вакуумметрического давления при разжатии стенок сосковой резины (переход к такту «сосание»), приводящая к реверсивному движению молока в доильном аппарате и повышению затрат энергии на процесс машинного доения.

Устранение данного негативного фактора при величине вакуума в доильном аппарате $p_v = 43$ кПа, частоте пульсаций $\chi_n = 60$ мин⁻¹, соотношении тактов «сосание»/«сжатие» 60/40 и разовом удое $m_p = 8,7$ кг от коровы снизит энергоемкость процесса машинного доения на 15,3 %.

Список цитированных источников

1. В 2021 году Беларусь произвела 7,8 млн тонн молока и чуть больше половины экспортировала [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dairynews.today/photoreports/v-2021-godu-belarus-proizvela-7-8-mln-tonn-moloka-.html>. — Дата доступа: 23.08.2022.

2. Беларусь в прошлом году поставила молочные продукты в 55 стран мира [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.belta.by/economics/view/belarus-v-proshlom-godu-postavila-molochnye-produkty-v-55-stran-mira-485283-2022>. — Дата доступа: 23.08.2022.
3. Куда движется белорусский молочный экспорт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dairynews.today/news/kuda-dvizhetsya-belorusskiy-molochnyy-eksport.html>. — Дата доступа: 23.08.2022.
4. Китиков, В. О. Стратегическое направление развития машинного доения коров / В. О. Китиков, А. Н. Леонов // Вести нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. — 2013. — № 4. — С. 91—104.
5. Китиков, В. О. Концепция создания физиологически щадящего процесса машинного доения коров / В. О. Китиков // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2017. — № 1. — С. 126—131.
6. Тенденция развития молочного рынка в мире и Беларуси [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.sb.by/articles/beloe-zoloto-moloko.html>. — Дата доступа: 20.06.2022.
7. Яловой, Д. И. Обоснование конструктивно-режимных параметров доильного аппарата непрерывного доения : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Д. И. Яловой. — Воронеж, 2017. — 175 л.
8. Устройство для доения коров : пат. 2556910 Рос. Федерация, МПК А01J 5/04 (2006.01) / А. А. Андрианов [и др.] ; заявитель Воронеж. ГАУ ; опубл. 20.07.2015.
9. Щукин, С. И. Обоснование параметров исполнительных механизмов доильного аппарата попарного действия : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / С. И. Щукин ; Моск. гос. агроинженер. ун-т им. В. П. Горячкина. — М., 2006. — 20 с.
10. Скворцов, В. П. Обоснование параметров и режимов работы исполнительных органов доильного аппарата : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / В. П. Скворцов. — Волгоград, 2005. — 186 л.
11. Макаровская, З. В. Технологические основы повышения эффективности работы доильных аппаратов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / З. В. Макаровская ; Оренбург. гос. аграр. ун-т. — Оренбург, 2004. — 43 с.
12. Китун, А. В. Машины и оборудование в животноводстве : учебник / А. В. Китун, В. И. Передня, Н. Н. Романюк. — Минск : БГАТУ, 2019. — С. 261—270.
13. Доильный стакан : пат. 22689 Респ. Беларусь, МПК А 01J5/08 / С. Н. Бондарев [и др.] ; заявитель Белорус. гос. аграр. тех. ун-т. — № 20180057 ; заявл. 14.02.2018 ; опубл. 02.07.2019 // Офиц. бюлл. / Нац. центр интелект. собственности. — 2019. — № 4. — С. 50.
14. Бондарев, С. Н. Влияние изменения вакуумметрического давления в доильном стакане на энергоёмкость процесса машинного доения коров / С. Н. Бондарев, А. В. Китун // Агропанорама. — 2022. — № 4. — С. 7—13.

Поступила в редакцию 11.10.2022.

УДК 621.565

В. К. Клыбик¹, кандидат технических наук,
Ю. А. Ракевич²

Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», ул. Кнорина, 1, 220049 Минск, Республика Беларусь,
+375 (17) 272 02 91, ¹labts@mail.ru, ²rakevich.1991@mail.ru

К ВОПРОСУ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПРОМЫВКИ МОЛОКООХЛАДИТЕЛЕЙ

В статье проведен обзор существующих распылительных устройств для эффективной промывки молокоохладителей. Предложено распылительное устройство вращающегося типа на 360° с механическим воздействием струи для быстрого и высокого качества мойки молочных танков при минимальном расходе воды. Вращающаяся головка распылителя обеспечивает увеличенное интенсивное ударное воздействие струи на загрязнения и равномерно распределяет моющий раствор по внутренним поверхностям стенок емкостей современных крупногабаритных молокоохладителей.

Качество молока, молочных продуктов и их бактериологическая безопасность в значительной степени зависят от санитарного состояния технологического оборудования. Эффективное нанесение раствора на внутреннюю поверхность емкости для охлаждения молока повышает качество удаления загрязнений, сокращает время мойки и, как следствие, обеспечивает экономию электроэнергии, воды и поверхностно-активных препаратов.

Ключевые слова: распылитель; молокоохладитель; мойка; молоко; качество; раствор; жидкость.

Рис. 2. Библиогр.: 14 назв.

V. C. Klybik¹, PhD in Technical Sciences,
Y. A. Rakevich²

Republican Unitary Enterprise “The Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on agricultural mechanization”, 1 Knorina Str., 220049 Minsk, the Republic of Belarus,
+375 (17) 272 02 91, ¹labts@mail.ru, ²rakevich.1991@mail.ru

TO THE QUESTION OF THE RATIONAL CHOICE OF A SPRAY DEVICE FOR MILK COOLERS EFFECTIVE WASHING

The article provides a review of existing spray devices for milk coolers efficient washing. A 360° rotating type-spraying device with a mechanical action of the jet for fast and milk tanks high quality washing with minimal water consumption is proposed. The rotating head of the atomizer provides an increased intense impact of the jet on impurities and distributes evenly the washing solution over the inner surfaces of the tanks walls of modern large-sized milk coolers.

The quality of milk and dairy products and their bacteriological safety largely depend on the sanitary condition of the technological equipment. Efficient application of the solution to the inside surface of the milk cooling container increases the quality of soil removal, reduces washing time and, as a result, saves energy, water and surfactants.

Key words: spray; milk cooler; washing; milk; quality; solution; liquid.

Fig. 2. Ref.: 14 titles.

Введение. Выполнение мероприятий Государственной программы развития аграрного бизнеса в Республике Беларусь на 2016—2020 годы в 2020 году обеспечило прирост производства молока в сельскохозяйственных организациях на 105,6 % в сравнении с 2019 годом при общем объеме производства в сельскохозяйственных организациях 7,503 млн тонн молока [1].

По прогнозам Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь экспортный потенциал молочной промышленности может достичь 3 млрд долларов уже к 2025 году. Для этих целей необходимо поднять уровень валового производства молока до

9,2 млн тонн. Для достижения данного показателя решается ряд задач по совершенствованию кормовой базы, технического оснащения производства и переработки молока [2].

Качество молока и молочных продуктов, а также их бактериологическая безопасность в значительной степени зависят от санитарного состояния технологического оборудования. Для того, чтобы не происходило бактериального обсеменения и загрязнения молочных продуктов, молокоохладители необходимо тщательно мыть и дезинфицировать. На поверхности оборудования загрязнения откладываются в виде остатков сырья, молочных продуктов и осадка (пригара), состоящих из белков, жиров, фосфатидов, комплексов денатурированных сывороточных белков с минеральными составляющими (молочного камня и др.). Обязательным условием эффективности дезинфекции должно быть полное удаление органических и неорганических загрязнений и остатков моющих средств с поверхности молокоохладителя после мойки [3].

Материалы и методы исследования. Наряду с увеличением производства молока необходимо предусматривать повышение его качества. Повышение его чистоты, в том числе снижение бактериальной загрязненности, не может не сказаться на состоянии здоровья потребителя. Кроме того, в условиях рыночной экономики фактор качества является одним из основных в сбыте молока. Это обусловлено, прежде всего, более высокими закупочными ценами на молоко сорта экстра. При производстве молока решающим фактором, который влияет на его качественные показатели, является санитарное состояние доильного оборудования. В процессе эксплуатации доильных установок на внутренних поверхностях их трубопроводов образуются разнообразные по составу, свойствам, толщине, прочности сцепления отложения, которые приводят к загрязнению молока, в результате чего происходит снижение его сортности и цены за реализацию. Согласно проведенным исследованиям, до 80 % первичной микрофлоры молока формируется за счет микрофлоры доильных аппаратов. Поэтому разработка технологических подходов, которые обеспечат эффективную очистку поверхностей от загрязнения, является первоочередной задачей, решение которой обеспечит получение высокосортного молока [4; 5].

Главная задача промывания — должным образом очистить доильное оборудование. Время циркуляционного промывания определяется в зависимости от типа моющего средства, дозирования, степени загрязненности и эффективности механического влияния. Как правило, это время составляет около 10 мин, если используется комбинированное (моющее и дезинфицирующее) средство, 7...8 мин для циркуляционного промывания моющим средством и 5 мин дезинфекции [6; 7].

Температура моющего раствора на начальном этапе циркуляционного промывания должна составлять 70...90 °C (чем выше, тем лучше) и быть не ниже 40 °C в конце циркуляционного промывания. Поддержание температуры раствора выше 40 °C необходимо для того, чтобы грязь, а особенно жир, оставались растворенными в воде и опять не оседали на стенки трубопроводов.

Механическое влияние для удаления остатков молока из внутренней поверхности молокопровода осуществляется потоком жидкости и воздуха, которые разгоняются в направлении молокоприемника за счет действия вакуума [8; 9].

Важным фактором, который влияет на эффективность дезинфекции, является концентрация и температура дезинфицирующего раствора. При низкой концентрации развитие микроорганизмов задерживается, но не происходит их уничтожение. Высокая концентрация может привести к коррозии технологического оборудования или выделению ядовитых веществ, опасных для здоровья человека. Кроме того, увеличивается расход дезинфицирующих средств. Вместе с тем концентрация должна быть выбрана с таким условием, чтобы обеспечивалось уничтожение микрофлоры на поверхности оборудования [10].

Выбор концентрации дезинфицирующих растворов связан с температурой и длительностью их влияния на поверхность оборудования. При низкой температуре уменьшается

диссоциация растворов, которая обуславливает снижение скорости диффузии химического вещества в микробную клетку. Например, при температуре 0 °С многие дезинфицирующие средства теряют свои свойства. С повышением температуры на 10 °С скорость химических реакций возрастает в 2...3 раза. Почти в такой же пропорции усиливается дезинфицирующее действие растворов. При 0 °С только хлорсодержащие растворы выявляют бактериальное действие. Температура дезинфицирующих растворов, которые не содержат хлор, должна быть в пределах 20...40 °С. Длительность дезинфекции — от 7 до 10 мин [11—13].

Для распылительной мойки внутренних поверхностей молокоохладителей применяют три типа оборудования для СІР-мойки (рисунок 1): стационарные распылительные; вращающиеся распылительные; вращающиеся струйные [14].

Применяют два подхода к мойке молокоохладителей: высокий расход и низкое давление; низкий расход и высокое давление.

Стационарные распылители — это жестко закрепленные опрыскивающие спрейболы, которые не вращаются, поэтому требуют значительно большего количества моющей жидкости для производства турбулентного потока. Прежде всего используются для простой промывки небольших емкостей. Мойка емкости достигается за счет стекания по стенкам емкости большого потока моющего раствора. Все распылители данного типа работают при низком и среднем давлении с использованием центробежного насоса. В соответствии с зоной действия статистический распылитель устанавливают в горизонтальные молокоохладители в центральной части.

Вращающиеся распылители свободно вращаются вокруг своей оси со щелевыми отверстиями в рабочей зоне; используются для очистки молокоохладителей малых и больших габаритов; работают при высоком давлении, что позволяет использовать меньшее количество дезинфицирующего средства для мойки молочного танка.

Вращающиеся струйные распылители — мощные струйные механизмы, которые обеспечивают интенсивную подачу моющего раствора через два и четыре цельноструйных сопла; используются для больших молочных танков до 24 м³; работают при высоком давлении с температурой моющей жидкости до 95 °С. Работает распылитель в двух плоскостях: горизонтальной и вертикальной. Благодаря высокому давлению моющая струя имеет максимальную дальность полета.

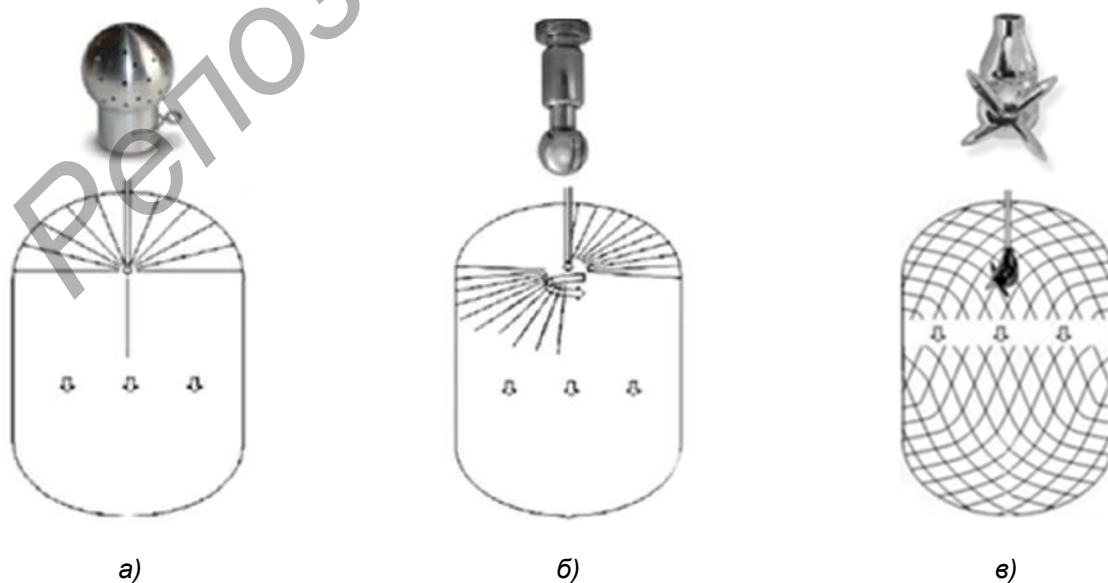


Рисунок 1. — Схема работы распылителя: а — стационарного; б — вращающегося; в — вращающегося струйного

Результаты исследования и их обсуждение. Обработка внутренних поверхностей закрытых молокоохладителей заключается в нанесении раствора моющего средства в виде напорных струй. При этом они не только вращаются в двух плоскостях, но еще и двигаются по сложным траекториям в пространстве. Поток падает на боковую поверхность как сверху вниз, так и снизу вверх. Его удар о стенку цистерны несколько ослабляется из-за того, что по поверхности стекает жидкость, нанесенная ранее. Из-за этого снижается гидродинамический эффект, загрязняется участок, который был уже очищен. Равномерность нанесения раствора не соблюдается.

Чтобы моющее средство падало на загрязненную поверхность равномерно, а кинетическая энергия струи использовалась в полной мере, жидкость перемещают «винтовым» способом: струя двигается по внутренней поверхности танка охладителя закрытого типа по винтовой линии сверху вниз, при этом шаг винта равен ширине полосы размыва. При такой технологии границы полос совпадают с минимальным перекрытием.

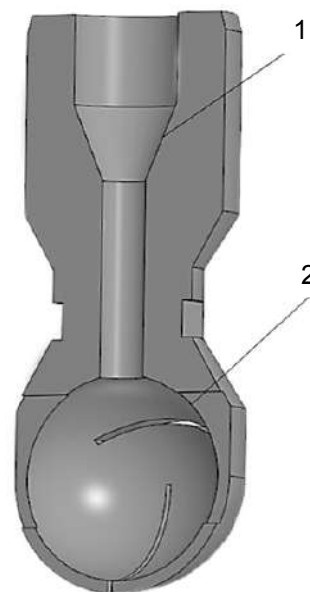
Скорость снижения струи по вертикальной линии должна быть значительно меньше, чем скорость стекания вниз жидкости, нанесенной ранее. Тогда в месте падения капель не окажется слоя раствора с грязью, т. е. ничто не будет ослаблять кинетическую энергию потока моющего средства.

Эффективное нанесение раствора на внутреннюю поверхность емкости для охлаждения молока повышает качество удаления загрязнений, сокращает время мойки и, как следствие, обеспечивает экономию электроэнергии, воды и поверхностно-активных препаратов.

Вращающаяся головка распылителя на 360° обеспечивает увеличенное интенсивное ударное воздействие струи на загрязнения и равномерно распределяет моющий раствор по внутренним поверхностям стенок емкостей современных крупногабаритных молокоохладителей (рисунок 2).

Данное конструктивное исполнение позволит соплам свободно вращаться в двух плоскостях вокруг вертикальной и горизонтальной осей от реактивных сил, возникающих в результате выброса струи из отверстий форсунки. Такое техническое решение обеспечивает подачу моющей жидкости на верхнюю часть внутренних стенок емкости и свободное стекание по поверхности на дно молокоохладителя, откуда затем снова в подающий насос и распылительную головку. Данный процесс многократно повторяется в течение всего времени промывки. Вариантом указанного механизма является модель, в которой трубчатые дуги разведены на угол 30° в горизонтальной плоскости. По отношению к оси вращения системы их верхние участки расположены под углом 60° . Такое изменение сделано в целях повышения эффективности удаления грязи, а также более удобной очистки самой моющей головки. При поступлении раствора под давлением $0,2 \dots 0,3$ МПа частота вращения механизма составляет $60 \dots 80$ об/мин. Это позволяет создать сферический поток моющего средства, который интенсивно омывает стенки танков охладителей закрытого типа.

Заключение. Эффективность санитарной обработки молокоохладителя будет зависеть от степени их загрязнённости, свойств моющих и дезинфицирующих средств, концентрации и температуры применяемых растворов, режима ополаскивания и выбора распылительного устройства. Использование поверхностно-активных веществ в моющих растворах в сочетании с механическим воздействием струи жидкости вращающегося распылителя на 360° ускоряет процесс и обеспечивает высокое качество очистки при минимальном расходе воды.



1 — вал; 2 —
распылитель

Рисунок 2. — 3D-модель распылителя вращающегося типа

Список цитированных источников

1. Клыбик, В. К. Пути совершенствования процесса мойки емкостей молокоохладителей / В. К. Клыбик, В. В. Никончук // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по механизации сел. хоз-ва. — Минск, 2022. — Вып. 55. — С. 117—120.
2. Новости экономики Беларуси [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.belta.by>. — Дата доступа: 16.03.2023.
3. Санитарная обработка технологического оборудования на предприятиях молочной отрасли : учеб.-метод. пособие / Л. А. Силантьева. — СПб. : Университет ИТМО, 2017. — 4 с.
4. Палий, А. П. Перспективные направления развития молочного скотоводства в Украине / А. П. Палий // Изв. Великолук. гос. с.-х. акад. — Великие Луки, 2014. — № 2. — С. 10—15.
5. Ушаков, Ю. А. Качество молока в зависимости от санитарного состояния доильного оборудования / Ю. А. Ушаков, А. А. Панин // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. — 2009. — № 1 (21). — С. 99—101.
6. Палій, А. П. Дослідження процесу очищення доїльних установок різного типу після доїння / А. П. Палій // Наук.-техн. бюл. — 2014. — № 112. — С. 109—114.
7. Жмырко, А. М. Закономерности изменения температурного режима мойки молокопровода / А. М. Жмырко, В. И. Березуцкий // Совершенствование процессов и техн. средств в АПК. — 2001. — Вып. 3. — С. 27—32.
8. Палій, А. П. Дослідження процесу промивання доїльних установок / А. П. Палій // Наук. вісн. Львів. нац. ун-ту ветеринар. медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького. Сер. «Сільськогосподарські науки». — 2015. — Т. 16, № 2 (59), ч. 3. — С. 156—161.
9. Молочников, В. В. Влияние санитарной обработки оборудования на качество молочных продуктов / В. В. Молочников // Улучшение качества молока и молочных продуктов. — М., 1980. — С. 184—190.
10. Цой, Ю. А. Параметры пробкового режима течения жидкости в молокопроводе при промывке / Ю. А. Цой, Р. А. Мамедова // Техника в сел. хоз-ве. — 2007. — № 2. — С. 3—4.
11. Палій, А. П. Аналіз вимог щодо режимів промивання молокопроводів доїльних установок / А. П. Палій // Вісн. Харків. нац. техн. ун-ту сіл. господарства ім. П. Василенка. — 2015. — Вип. 157 : Технічні системи і технології тваринництва. — С. 28—32.
12. Paliy, A. P. Innovations in the study of us properties linersmilking machine / A. P. Paliy // Вісн. Сум. нац. аграр. ун-ту. Сер. «Тваринництво». — 2015. — Вип. 6 (28). — С. 129—132.
13. Baines, J. Clean machines a must for low bacteria counts / J. Baines // Farmers Weekly. — 1992. — № 1290. — Р. 4—6.
14. Палий, А. П. Инновационный подход в определении чистоты доильно-молочного оборудования / А. П. Палий // Вестн. Новосиб. гос. аграр. ун-та. — 2015. — № 4 (37). — С. 161—166.

Поступила в редакцию 21.03.2023.

УДК 621.929:636(476)

И. М. Швед

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 272 68 18, terechovich@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОГО НАВОЗА МИКСЕРОМ С КОНИЧЕСКИМ КОЖУХОМ

Жидкий навоз при хранении легко расслаивается, при отсутствии его перемешивания на поверхность всплывают легкие примеси, а тяжелые частицы образуют осадок на дне навозохранилища. Для получения качественного органического удобрения необходимо обеспечить эффективное перемешивание жидкого навоза, осуществив размыв осадка на дне навозохранилища. Процесс перемешивания жидкого навоза совмещает в одной технологической цепи последовательно происходящие процессы размыва уплотненного за время хранения осадка навоза и его смешивания во всем объеме хранящейся навозной массы. Размыв осадка в навозохранилище осуществляется установленным в слое жидкой фракции миксером, что может быть сравнимо с подводным гидрорыхлением грунтов, которое осуществляется затопленной струей, истекающей из кожуха миксера. Для обеспечения работы необходимого оборудования, применяемого в данном технологическом процессе, с минимальными энергозатратами требуется поддержание оптимальных конструктивных и технологических параметров оборудования. В статье получены уравнения для определения длины участка размыва осадка и потребной мощности на привод миксера при известном диаметре выходного отверстия сопла. Построены графики зависимости потребной мощности миксера и длины участка размыва осадка от диаметра выходного отверстия сопла.

Ключевые слова: диаметр отверстия сопла; кожух; миксер; жидкий навоз; осадок; длина участка размыва; размыв осадка.

Рис. 3. Табл. 1. Библиогр.: 12 назв.

I. M. Shved

Institution of Education "Belarusian State Agrarian Technical University", 99 Nezavisimosti Ave.,
220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 272 68 18, terechovich@mail.ru

RESEARCH OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE MIXING LIQUID MANURE PROCESS WITH A MIXER WITH A CONICAL CASING

During storage, liquid manure is easily stratified and, in the absence of its mixing, light impurities float to the surface, and heavy particles form a sediment at the bottom of the manure storage. To obtain high-quality organic fertilizer, it is necessary to ensure effective mixing of liquid manure by washing out the sediment at the bottom of the manure storage. The process of mixing liquid manure combines in one technological chain the processes of washing out the manure sediment compacted during storage and mixing it in the entire volume of the stored manure mass. Sediment erosion in the manure storage is carried out installed in the layer of the liquid fraction of the mixer, which can be compared with underwater hydraulic loosening of soils, which is carried out by a submerged jet flowing from the mixer casing. To ensure the operation of the necessary equipment used in this process with minimal energy consumption, it is required to maintain the optimal design and technological parameters of the equipment. In the article, equations for determining the length of the sediment washout section and the required power for the mixer drive with a known diameter of the nozzle outlet are obtained. Graphs of the required power dependence of the mixer and the length of the sludge washout section on the diameter of the nozzle outlet are plotted.

Key words: nozzle hole diameter; casing; mixer; liquid manure; sludge; washout section length; sludge washout.
Fig. 3. Table. 1. Ref.: 12 titles.

Введение. Главными направлениями развития сельского хозяйства Беларуси являются отрасли растениеводства и животноводства. Развитие животноводства — одно из приоритетных направлений агропромышленного комплекса Республики Беларусь. Для обеспечения своего благоприятного экономического положения производство животноводческой продукции должно быстро реагировать на требования рынка сбыта продукции.

Одной из основных задач Государственной программы «Аграрный бизнес» на 2021—2025 годы является развитие производства органической продукции и снижение негативного воз-

действия химических препаратов, гормонов роста, антибиотиков на окружающую среду и здоровье людей [1]. Для осуществления поставленной задачи необходимо совершенствовать машины и оборудование для утилизации и переработки жидкого навоза.

В Республике Беларусь действует более 200 животноводческих комплексов по производству молока, говядины и свинины. Общий годовой выход экскрементов при работе комплексов равен 51,6 млн тонн, из которых 25,3 млн тонн составляет жидкий навоз [2]. При этом в 2010 году общий годовой выход жидкого навоза на фермах и комплексах составлял 12,2 млн тонн [3].

Недостаточность осуществляемых работ по обеззараживанию и переработке жидкого навоза и сточных вод влечет за собой нарушение экологической обстановки вокруг ферм, что в дальнейшем может привести к возможности распространения инфекционных и инвазионных болезней.

Жидкий навоз перерабатывают двумя способами: компостированием и перемешиванием. Компостирование — экзотермический процесс биологического окисления, при котором под воздействием температуры наступает гибель болезнетворных микробов [4].

К преимуществу данного способа переработки навоза относят то, что компост является качественным органическим удобрением, оптимальным для полей, планируемых под высевание озимых и пропашных культур. Применение компостов улучшает качество почвы и сокращает количество органических отходов на животноводческих фермах и комплексах.

Основным недостатком является длительный процесс компостирования, который привлекает к себе разного рода вредителей (мух, грызунов и т. д.) и требует дополнительного обслуживания оборудования, эксплуатируемого при данном процессе.

Перемешивание — переработка жидкого и полужидкого навоза, получаемого на животноводческих фермах при гидравлическом способе уборки навоза [4].

Преимуществом перемешанного жидкого навоза является то, что его можно использовать различными способами: вносить в почву мобильными средствами, подавать по трубам на поле насосами, вносить на поле отдельно твердую и жидкую фракцию — что не требует применения высокотехнологичного оборудования.

В случае использования неразделенного жидкого навоза необходимо не реже одного раза в неделю проводить его перемешивание в полном объеме навозохранилища, так как хранящаяся навозная масса быстро расслаивается и в осадок выпадает до 80 % твердых частиц [5]. Частое использование оборудования для перемешивания навозной массы приводит к увеличению энергозатрат на уборку и утилизацию жидкого навоза.

В связи с вышеизложенным можно утверждать, что совершенствование оборудования для перемешивания жидкого навоза является актуальной задачей.

Цель работы — установление зависимости потребной мощности миксера и длины участка размыва осадка от выходного отверстия сопла кожуха.

Материалы и методы исследования. Согласно ГОСТ Р 53042-2008, жидким навозом называется навоз (помет), содержащий от 3 до 8 % сухого вещества.

Жидкий навоз представляет собой многокомпонентную среду. Вязкость ньютоновских жидкостей меняется при разной температуре, давлении и не остается величиной постоянной, а изменяется в зависимости от скорости деформаций сдвига [6]. Исследования физико-механических свойств жидкого навоза показали, что при концентрации сухого вещества менее 8 % он является ньютоновской жидкостью [7].

Для проверки теоретических исследований и установления зависимости длины участка размыва осадка навоза и потребной мощности миксера от диаметра выходного отверстия сопла кожуха были проведены экспериментальные исследования на устройстве, оснащённом коническим кожухом (рисунок 1), позволяющим создать стабильное ядро струи и обеспечивающим эффективный размыв уплотненного осадка.

Исследования проводились на экспериментальной установке (рисунок 2), выполненной в соотношении 1:20 к эксплуатируемому на фермах (комплексах) оборудованию.

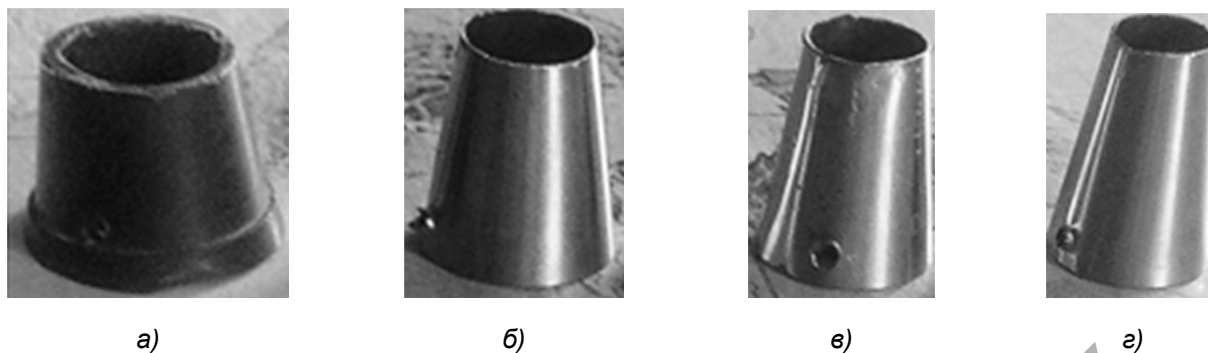
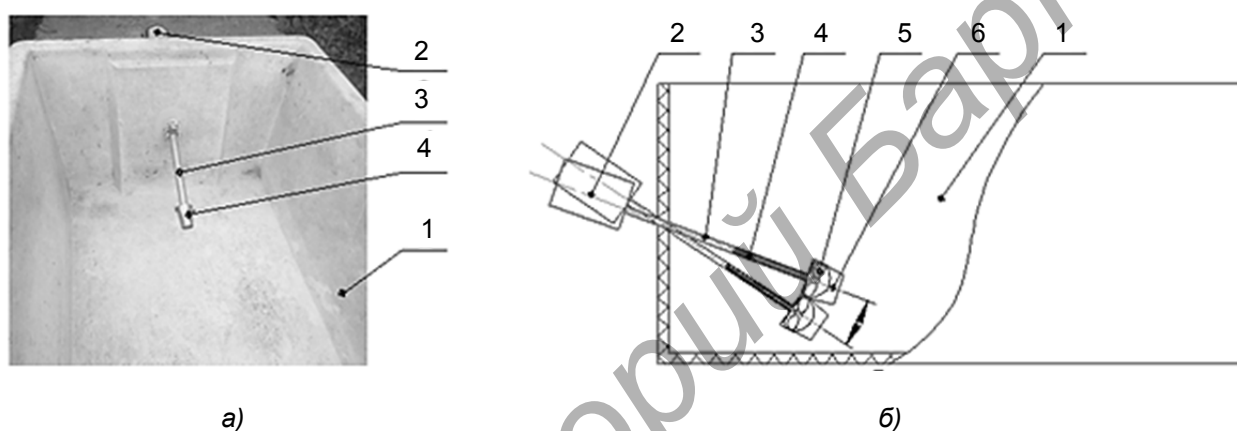


Рисунок 1. — Модели конических кожухов: а — $d_c = 25$ мм, $\alpha = 35^\circ$; б — $d_c = 20$ мм, $\alpha = 35^\circ$; в — $d_c = 20$ мм, $\alpha = 30^\circ$; г — $d_c = 15$ мм, $\alpha = 30^\circ$



1 — емкость; 2 — привод мешалки; 3 — труба; 4 — кожух; 5 — вал; 6 — мешалка

Рисунок 2. — Экспериментальная установка с коническим кожухом: а — общий вид; б — схема экспериментальной установки

При проведении экспериментальных исследований были использованы кожухи конической формы с разными диаметрами сопла d_c и углами наклона образующей конической поверхности кожуха ($\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 35^\circ$).

Оптимальная геометрическая конфигурация формы кожуха миксера способствует наиболее эффективному использованию струи жидкого навоза в процессе размыва уплотненного осадка, так как от угла образующей боковой поверхности кожуха зависит баланс энергозатрат на трение жидкого навоза по внутренним стенкам кожуха и на рассеяние потока навозной массы в объеме хранящегося навоза. С увеличением скорости потока жидкого навоза осуществляется внедрение струи в осадок, при образовании воронки в дальнейшем происходит сводоразрушение краев воронки с увеличением общей площади участка размыва осадка.

Результаты исследования и их обсуждение. Независимо от того, как выполняется переработка жидкого навоза (по раздельной технологии или нет), необходимо в любом случае осуществлять процесс его перемешивания.

Для раздельной технологии переработки жидкого навоза можно применить одно перемешивание перед его внесением на поле в отличие от неразделенного навоза, у которого из-за высокой плотности осадка и быстрого его осаждения перемешивание необходимо осу-

ществлять не менее трех раз в неделю. Последствием невыполнения операции перемешивания жидкого навоза будут затраты, связанные с ремонтом оборудования, используемого в навозохранилищах, и постепенное заиливание, уменьшающее их полезный объем.

Эксплуатируемые миксеры для перемешивания жидкого навоза, представленные на рынке Республики Беларусь, просты по устройству. Они оснащены разного типа мешалками и кожухами для улучшения характеристик потока жидкого навоза, созданного истекающей из его отверстия струей [8; 9].

Основными геометрическими параметрами, влияющими на работу миксера, оснащенного коническим кожухом, являются длина и диаметр выходного отверстия сопла [10—12], так как при использовании сопел большой длины и с большим выходным отверстием на размыв осадка навоза приходится основная часть энергозатрат миксера ввиду перемещения большого объема струи жидкого навоза. При использовании сопел с маленьким диаметром выходного отверстия на размыв осадка навоза затрачивается только часть мощности миксера. Поэтому если ограничиться только разрушением уплотненного слоя навоза и не рассматривать качество перемешивания, то целесообразнее применять кожухи с малым диаметром выходного отверстия сопла, а так как процесс перемешивания жидкого навоза в навозохранилище подразумевает выполнение разрушения уплотненных слоев и перемешивание их в полном объеме хранящейся навозной массы, то необходимо выполнить исследования по определению влияния диаметра выходного отверстия сопла на технологические параметры миксера.

Также на процесс размыва осадка навоза влияют следующие параметры: угол наклона миксера относительно горизонтальной плоскости, плотность осадка и высота расположения миксера в навозохранилище.

На основании проведенных теоретических исследований [12] была получена формула для определения длины участка размыва осадка навоза, которая позволила установить основные факторы, влияющие на процесс разрушения уплотненного слоя навоза:

$$L_p = \frac{2 \sin(180^\circ - (\alpha + \beta_o))}{\sin \beta_o} \left(\frac{\varphi d_c \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_o}{\rho_c}}}{1 - 0,475 \varphi \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_c}}} - \frac{h_{\text{микс}} - h_o}{\sin \alpha} \right), \quad (1)$$

где α — угол наклона струи жидкого навоза, град.;
 β_o — угол откоса наклонной поверхности на участке размыва, град.;
 φ — опытный коэффициент;
 d_c — диаметр отверстия сопла кожуха, м;
 ρ_o — плотность осадка навоза, кг / м³;
 ρ_c — плотность навозной массы, выходящей из кожуха, кг / м³;
 $h_{\text{микс}}$ — высота расположения миксера относительно дна хранилища, м;
 h_o — высота осадка навоза, м.

Согласно расчету, проведенному по формуле (1), длина участка размыва осадка навоза составила 5,1 м (для $h_{\text{микс}} = 1,0$ м, $h_o = 0,75$ м, $d_c = 0,380$ м).

Программой исследования предусмотрено перемешивание навоза влажностью не менее 92 % при помощи перемешивающего устройства, оснащенного кожухом конической формы и без него. Устройство монтировалось в емкости с возможностью регулирования высоты поднятия и угла наклона кожуха относительно дна емкости.

В процессе исследований было установлено, что в устройстве без кожуха происходит отрыв потока жидкого навоза, перемещающегося вдоль лопасти к ее кромке, что приводит к образованию зоны турбулентности, препятствующей продвижению струи в уплотненный осадок.

Установка кожуха конической формы позволила исключить описанный выше отрыв потока навозной массы, что способствовало увеличению скорости движения и созданию стабильного ядра струи жидкого навоза, необходимого для осуществления размыва уплотненного осадка.

Результаты исследования технологических параметров процесса перемешивания жидкого навоза миксером с коническим кожухом представлены в таблице 1 и на рисунке 3, на котором приведены графические зависимости длины участка размыва осадка навоза и потребной мощности на привод миксера от диаметра выходного отверстия сопла кожуха.

Т а б л и ц а 1. — Результаты исследования технологических параметров процесса перемешивания жидкого навоза миксером с коническим кожухом

Диаметр выходного отверстия сопла d_c , мм	Число оборотов мешалки n , мин ⁻¹	Угол наклона образующей конической поверхности кожуха 30°		Угол наклона образующей конической поверхности кожуха 35°	
		Длина участка размыва осадка навоза L_p , м	Потребная мощность на привод миксера N , кВт	Длина участка размыва осадка навоза L_p , м	Потребная мощность на привод миксера N , кВт
300	150	0,85	2,8	0,82	2,9
330	180	1,98	3,0	1,67	3,2
360	215	3,21	3,3	2,76	3,6
390	250	4,58	4,0	3,95	4,3
420	290	6,54	4,8	5,60	5,2
450	350	9,05	5,7	7,98	6,1

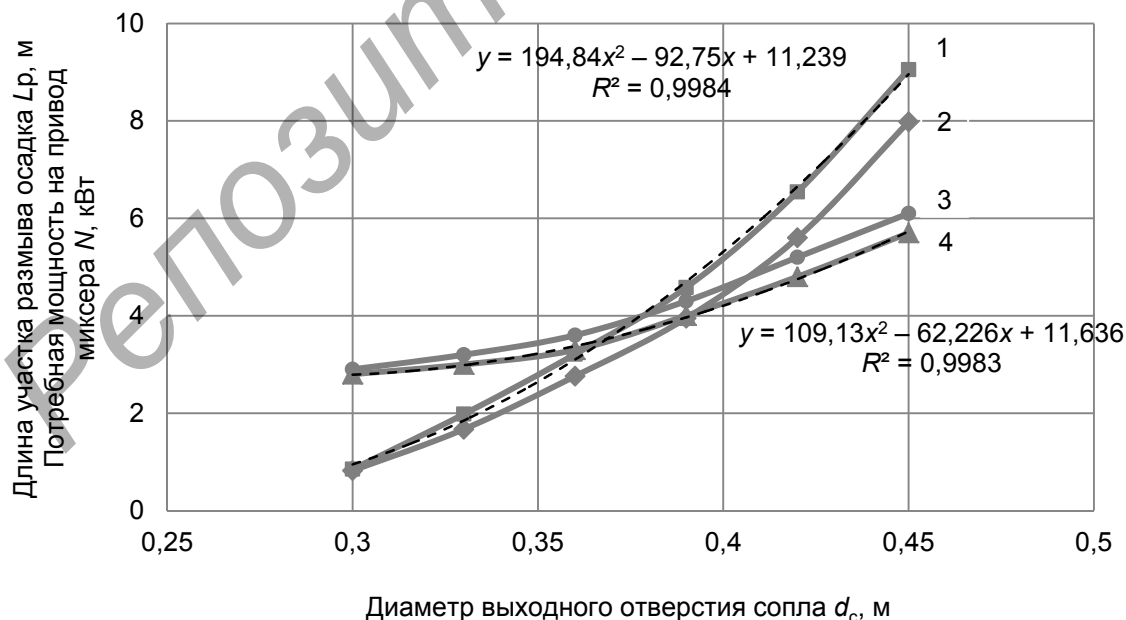


Рисунок 3. — Графические зависимости длины участка размыва осадка (1, 2) и потребной мощности на привод миксера (3, 4) от диаметра выходного отверстия сопла: 1 и 4 — модель с углом наклона образующей боковой поверхности кожуха 30°; 2 и 3 — модель с углом наклона образующей боковой поверхности кожуха 35°

На основании зависимостей, представленных на рисунке 3, получены уравнения для определения длины участка размыва осадка навоза и потребной мощности на привод миксера:

$$L_p = 194,84d_c^2 - 92,75d_c + 11,239, \quad (2)$$

где L_p — длина участка размыва осадка навоза, м;

d_c — диаметр выходного отверстия сопла, м.

Величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9984$;

$$N = 109,13d_c^2 - 62,226d_c + 11,636, \quad (3)$$

где N — потребная мощность на привод миксера, кВт.

Величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9983$.

Заключение. Анализ зависимостей, представленных на рисунке 3, показал, что для осуществления процесса размыва осадка навоза с последующим его перемешиванием во всем объеме навозохранилища целесообразно использовать конические кожухи с диаметром выходного отверстия сопла более 370 мм и углом образующей боковой поверхности кожуха 30° . При использовании кожуха с диаметром выходного отверстия сопла меньше 370 мм энергозатраты ниже, но при этом и длина участка размыва осадка навоза не превышает 4 м, что потребует установки дополнительного оборудования в навозохранилище.

На основании полученной зависимости (см. рисунок 3) была подтверждена достоверность теоретических исследований. Для сопла с диаметром 380 мм и углом образующей боковой поверхности кожуха 30° длина участка размыва осадка навоза составила 4,5 м. Отклонения от данных, полученных расчетным путем, составили 12 %.

Получены уравнения (2) и (3), устанавливающие зависимость длины участка размыва осадка навоза и потребной мощности на привод миксера от диаметра выходного отверстия сопла кожуха.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании конических кожухов, устанавливаемых на оборудовании для перемешивания жидкого навоза.

Список цитированных источников

1. О Государственной программе «Аграрный бизнес» на 2021—2025 годы [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 1 февр. 2021 г., № 59 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. — Минск, 2021.
2. Сельское хозяйство Республики Беларусь : стат. сб. — Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2016. — 230 с.
3. Самосюк, В. Г. Биогазовые технологии в Беларуси: состояние и перспективы / В. Г. Самосюк, Н. Ф. Капустин, А. Н. Басаревский // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межведомств. темат. сб. : в 2 т. / Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по механизации сел. хоз-ва. — Минск, 2011. — Вып. 45. — С. 234—240.
4. Кольга, Д. Ф. Биологическое компостирование навоза как наиболее эффективный метод его утилизации / Д. Ф. Кольга, В. С. Сыманович, С. А. Зелинский // Инновационные технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции : докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 14—15 апр. 2011 г. : в 2 ч. — Минск : БГАТУ, 2011. — Ч. 1. — С. 270—272.
5. Справочник агрохимика / В. В. Лапа [и др.] ; под ред. В. В. Лапа. — Минск : Белорус. наука, 2007. — 390 с.
6. Караева, Ю. В. Оценка динамической вязкости субстратов, используемых для получения биогаза / Ю. В. Караева, И. А. Трахунова // Технические науки — от теории к практике : сб. ст. по материалам XXV междунар. науч.-практ. конф. — Новосибирск : СибАК, 2013. — № 8 (21). — С. 84—90.
7. Ворожцов, О. В. Обоснование технологических и конструктивных параметров перемешивающего устройства, обеспечивающего гомогенизацию жидкого свиного навоза при его хранении в плёночных навозохранилищах : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / О. В. Ворожцов. — СПб., 2018. — 195 л. : ил.

8. *Куріс, Ю. В.* Підвищення теплотехнічних та технологічних показників спалювання біогазу в теплогенеруючому обладнанні : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Ю. В. Куріс. — Київ : НУХТ, 2007.
9. *Schlicht, A. C.* The Gaslifter. A time-honored, proven anaerobic digester mixing system / A. C. Schlicht. — Aurora : Walker Process Equipment, 2001. — P. 12.
10. *Виноградов, Л. В.* Исследование геометрических параметров сопла с контуром Витошинского / Л. В. Виноградов, Ш. Р. Лотфулин // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер. «Инженерные исследования». — 2004. — № 2 (9). — С. 44—49.
11. Теоретическое и экспериментальное исследование течения газа в коллекторах (соплах) при малых дозвуковых скоростях / А. П. Быркин [и др.] // Уч. зап. ЦАГИ. — 1983. — Т. XIV, № 5 — С. 100—103.
12. *Китун, А. В.* Определение параметров участка размыва осадка в навозохранилище направленным действием струи жидкого навоза / А. В. Китун, И. М. Швед // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2022. — № 1 (11). — С. 81—87.

Поступила в редакцию 03.02.2023.

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.

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.

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