

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 1 (17), май, 2025

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 докторских исследований по техническим наукам.

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

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

Заведующий редакционно-издательской группой А. Ю. Сидоренко
Технический редактор А. Ю. Сидоренко
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 23.04.2025. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 8,40. Уч.-изд. л. 5,30.
Тираж 22 экз. Заказ . Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: республиканское унитарное предприятие «Информационно-вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь». Специальное разрешение (лицензия) на право осуществления полиграфической деятельности № 02330/89 от 3 марта 2014 года.

Адрес: ул. Кальварийская, 17, 220004 г. Минск.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кочурко В. И. (главный редактор журнала), 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. (заместитель главного редактора журнала), кандидат экономических наук, доцент, первый проректор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Сотник Л. Л. (главный редактор журнала), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

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

Зубрицкая Л. С. (редактор текстов на английском языке) (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 аэроинженерных 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);

Бель 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);

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); **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).

BarSU Herald

A scientific and practical journal

Published since March 2013
It is published 2 times a year

No. 1 (17), May, 2025

Series "Engineering"

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 A. Y. Sidorenko
Desktop Publishing S. M. Glushak
Proofreader N. N. Kolodko*

Signed print 23.04.2025. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 8.40.
Acc.-pub. s. l. 5.30. Circulation of 22 copies.
Order . Free price.

Printing performance: Republican Unitary Enterprise "Information and Computing Center of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus". Special permission (license) for the right to carry out printing activities No. 02330/89, March 3, 2014.
Address: 17 Kalvariyskaya, 220004 Minsk

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).

Sotnik L. L. (*the series editor-in-chief*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (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); **Zhilakov 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).

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Карачевцева А. В., Фадин Ю. М., Анциферов С. И., Бурянов А. Ф. Прочностной анализ рекуператорного холодильника вращающейся печи с внешними теплообменными устройствами

Матяс А. Н., Милюкова А. М., Малеронок В. В. Численное моделирование процесса магнитно-импульсной упрочняющей обработки плоского режущего инструмента в ANSYS и определение взаимного расположения системы «индуктор—изделие»

Милюкова А. М., Алифанов А. В., Голубев В. С., Лях А. А., Толкачева О. А., Матяс А. Н. Повышение свойств стали методом комбинирования лазерной и магнитно-импульсной обработок

Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К. Водоэмulsionная смазка для песчано-смоляных стержней, изготавливаемых по нагреваемой оснастке

Филиппов А. И., Лещик С. Д., Калугин Ю. К., Дубень И. В. Анализ влияния факторов лазерного упрочнения на износ поверхностей контактирующих деталей автотранспортных средств

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Башаримов М. В., Жигалов А. Н., Жариков А. Н. Исследования влияния метода аэродинамической звуковой обработки на семена кукурузы сорта Американская лига 98 (Китайская Народная Республика) в условиях государственного научного учреждения «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларусь»

Ермаков А. И., Зеленко С. А., Язенков А. А. Исследование влияния режимных параметров пневматического канала зерноочистительной машины

Китун А. В., Крупенин П. Ю. Анализ и обоснование технологических параметров стационарных систем кормления крупного рогатого скота

CONTENTS

MACHINE BULDING AND ENGINEERING SCIENCE

- 4 **Karachevtseva A. V., Fadin Yu. M., Antsiferov S. I., Buryanov A. F.** Strength analysis of a rotary kiln recuperator refrigerator with external heat exchangers
- 12 **Matsias A. N., Miliukova A. M., Maleronok V. V.** Numerical simulation of hardening magnetic-pulse treatment of a flat cutting tool in ANSYS and determination of the relative position of the “inductor—product” system
- 24 **Miliukova A. M., Alifanov A. V., Golubev B. C., Lyakh A. A., Tolkachova O. A., Matsias A. N.** Improving the properties of steel by combining laser and magnetic pulse treatments
- 32 **Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K.** Water-based emulsion lubricant for sand-resin rods manufactured using heated tooling
- 39 **Filippov A. I., Leshchik S. D., Kalugin Yu. K., Duben I. V.** Analysis of the influence of laser hardening factors on the surface wear of contacting parts of motor vehicles

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

- 45 **Basharimov M. V., Zhigalov A. N., Zharikov A. N.** Investigation of the effect of aerodynamic sound treatment method on corn seeds of the American League 98 variety (China) in the conditions of state scientific institution “Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus”
- 53 **Ermakov A. I., Zelenko S. A., Yazenkov A. A.** Investigation of the impact of the pneumatic channel operating parameters of the grain cleaning machine
- 60 **Kitun A. V., Krupenin P. Y.** Analysis and rationale of technological parameters of stationary cattle feeding systems

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

УДК 666.94

А. В. Карабечева¹,

Ю. М. Фадин², кандидат технических наук, доцент,

С. И. Анциферов³, кандидат технических наук,

А. Ф. Бурянов⁴, профессор, доктор технических наук

^{1, 2, 3}Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», ул. Костюкова, 46,
308012 Белгород, Российской Федерации, ¹karachevtseva.anastasiia@gmail.com

⁴Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский Московский государственный строительный университет», Ярославское шоссе, 26,
129337 Москва, Российской Федерации, rga-service@mail.ru

**ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ РЕКУПЕРАТОРНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА
ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ С ВНЕШНИМИ ТЕПЛООБМЕННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ**

Статья посвящена прочностному анализу рекуператорного охладителя вращающейся печи $\varnothing 4 \times 127$ м, используемой в цементной промышленности. В работе представлены результаты исследования, проведенного на основе цифрового двойника печи в целях оценки влияния увеличения производительности на эксплуатационные нагрузки, действующие на рекуператорный охладитель. Описаны конструктивные особенности вращающейся печи, включая её основные элементы: корпус, опорные станции, привод, зубчатый венец и рекуператорный охладитель. Для анализа использовалась конечно-элементная модель, созданная в специализированном программном обеспечении. В процессе исследования были определены нагрузки, действующие на рекуператор, и проведены расчеты напряжений и деформаций. Результаты показали, что рекуператор обладает достаточным запасом прочности и жесткости при увеличении производительности печи на 20 %. Условия прочности и жесткости были проверены, все расчетные параметры соответствуют допустимым значениям. Работа подтверждает возможность повышения производительности вращающейся печи без ущерба для её надежности.

Ключевые слова: вращающаяся печь; рекуператорный охладитель; прочностной расчёт; конечно-элементная модель; цифровой двойник; теплообменное устройство.

Рис. 11. Табл. 1. Библиогр.: 12 назв.

A. V. Karachevtseva¹,

Yu. M. Fadin², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

S. I. Antsiferov³, PhD in Technical Sciences,

A. F. Buryanov⁴, DSc in Technical Sciences, Professor

^{1, 2, 3}Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 46 Kostyukova Str., 308012 Belgorod,
Russian Federation, ¹karachevtseva.anastasiia@gmail.com

⁴Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Highway,
129337 Moscow, Russian Federation, rga-service@mail.ru

**STRENGTH ANALYSIS OF A ROTARY KILN RECUPERATOR REFRIGERATOR
WITH EXTERNAL HEAT EXCHANGERS**

The present article is devoted to the strength analysis of the recuperator cooler of a rotary kiln of the $\varnothing 4 \times 127$ m type, which is utilised in the cement industry. The paper presents the findings of a study conducted on the basis of the digital twin of the furnace. The aim of the study was to assess the impact of increased productivity on the operational loads acting on the recuperator cooler. The design features of a rotary kiln are described, including its main elements: housing, support stations, drive, gear ring and recuperator cooler. The analysis was conducted utilising a finite element model, which was created in a specialised software program. The study involved the determination of the loads acting on the heat exchanger and the subsequent performance of stress and strain calculations. The study's findings indicated that the recuperator demonstrated

adequate strength and rigidity, contributing to a 20 % increase in furnace productivity. The strength and stiffness conditions have been verified, and all design parameters correspond to acceptable values. The study thus confirms the possibility of enhancing the productivity of a rotary kiln without compromising its reliability.

Key words: rotating furnace; recuperator cooler; strength calculation; finite element model; digital twin; heat exchangers.

Fig. 11. Table 1. Ref.: 12 titles.

Введение. В настоящее время одной из наиболее значимых отраслей промышленности России является промышленность строительных материалов. В свою очередь, производство строительных материалов по объему производства и потребления разделяется на основные товарные подгруппы. Так, лидирующую позицию с большим отрывом занимает производство цемента. По последним данным, за 2023 год в России производство цемента составило 62,6 млн т, а объемы потребления — примерно 64,9 млн т. Такие значительные показатели объясняются тем, что цемент — основной строительный материал. Процесс производства цемента является весьма дорогостоящим и энергоемким, поэтому на данный момент стремительными темпами создаются решения по увеличению объемов выпускаемой продукции с максимально возможным уменьшением удельных энергозатрат на ее производство [1]. Таким образом, совершенствование технологических процессов и оборудования промышленности строительных материалов является актуальной задачей [2].

На сегодня существует два основных способа производства цемента:

— мокрый — все сырьевые компоненты измельчаются в процессе смешивания с водой, тем самым образуется шлам влажностью 35...40 %, который затем подвергается термической обработке;

— сухой — влажные сырьевые компоненты измельчаются, затем подвергаются сушке, вследствие чего получается сырьевая мука влажностью не более 1 %.

Клинкер выступает в качестве промежуточного продукта в технологии производства цемента. Он образуется в результате равномерного обжига измельченной смеси сырья, которая состоит из известняка, глины и шлаков. Обжиг клинкера выполняется во вращающейся печи.

Вращающиеся печи используются как при сухом, так и при мокром способе производства, но с рядом отличительных особенностей. Именно вращающиеся печи определяют производительность цементного завода, поэтому совершенствование ее конструкции в целях снижения удельных энергозатрат и повышения производительности является самой востребованной темой исследования.

На территории Российской Федерации подавляющее число предприятий, которые производят цемент, применяют мокрый способ производства. При этом способе применяются длинные вращающиеся печи от 80 до 230 м с шестью зонами, распределенными по всей длине печи. Зона охлаждения является заключительной зоной, в которой происходит однотипный процесс — охлаждение клинкера, для которого применяются различные виды охладительных устройств, такие как барабанные, колосниковые или рекуператорные охладители.

Печи отечественных заводов производства цемента в основном оснащены рекуператорными охладителями. Такие охладители располагаются на разгрузочном конце печи и направлены на повышение эффективности охлаждения материала.

Материалы и методы исследования. Исследования проводились на основе цифрового двойника вращающейся печи $\varnothing 4 \times 127$ м, производительность которой была повышена [3]. Повышение производительности печи привело к увеличению эксплуатационных нагрузок, действующих на рекуператорный охладитель [4].

Конструкция печи (рисунок 1) состоит из сварных листовых обечаек корпуса 1, который изнутри футеруется огнеупорным кирпичом. На корпусе печи на определенном расстоянии друг от друга располагаются опорные станции 2. С помощью кольцевых бандажей прямоугольного сечения корпус печи опирается на ролики опорной станции. Размеры и количество бандажей, как и количество опорных станций, варьируются в зависимости от диаметра и длины печи соответственно [5].

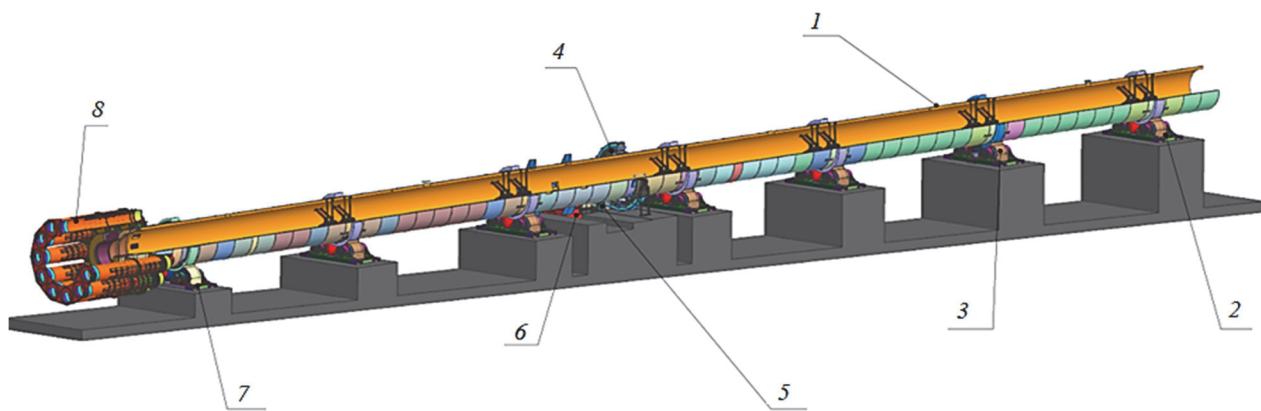
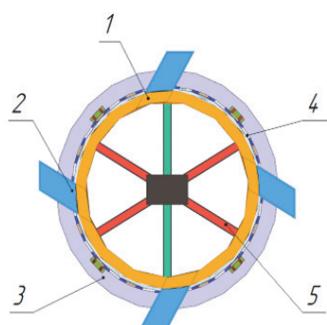


Рисунок 1. — Цифровой двойник вращающейся печи



1 — футеровка; 2 — теплообменное устройство; 3 — бандаж;
4 — корпус; 5 — распорка

Рисунок 2. — Цифровой двойник вращающейся печи с внешними теплообменными устройствами

Особенностью данной печи является наличие внешних теплообменных устройств 2 (рисунок 2), которые расположены по периферии корпуса 4. Установка внешних теплообменных устройств по периферии корпуса печи позволяет решить проблему недостаточного подъема материала со дна, а также способствует его перемещению, что, в свою очередь, приводит к дальнейшему улучшению процесса.

Рекуператорная установка включает в себя 11 небольших охлаждающих барабанов, равномерно расположенных по периферии корпуса печи и установленных на подрекуператорную обечайку (рисунок 3).

Материал поступает в рекуператор (рисунок 4) под действием силы тяжести благодаря вращению печи. Для оптимизации процесса пересыпания клинкера во время вращения печи внутренняя часть рекуператора, находящаяся со стороны горячего конца, облицована броневыми плитами 4, 6, которые оборудованы различными типами полок из жаропрочного чугуна.

Конструкция опорно-упорной станции 3 отличается от конструкции опорной станции наличием на раме закрепленного узла предохранительного упора, предотвращающего осевое смещение корпуса. Ролик предохранительного упора способен удерживать корпус лишь в течение ограниченного времени, и, если не будут предприняты необходимые меры, бандажи могут соскользнуть с опорных роликов. В этом случае бандаж контактирует с роликом предохранительного упора своей торцевой поверхностью [6].

Корпус печи вращается приводом 6, включающим в себя электродвигатель, редуктор и вспомогательное устройство, а также зубчатым венцом 4, который состоит из установки подвенцовой шестерни 5 и зубчатого колеса. Энергия передается от электродвигателя через редуктор, поступает на подвенцовую шестерню, а далее передается на зубчатый венец, закрепленный по окружности вращающейся печи. В горячем конце печи расположена подрекуператорная опорная станция 7 и рекуператорный охладитель 8 (см. рисунок 1).

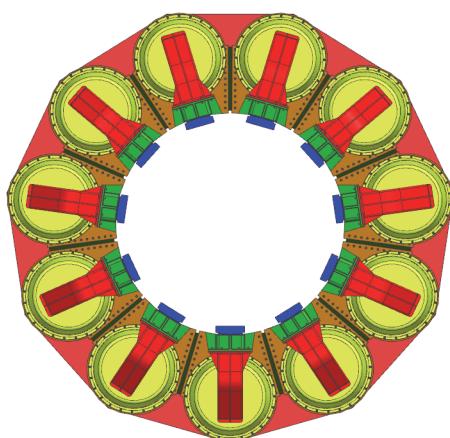
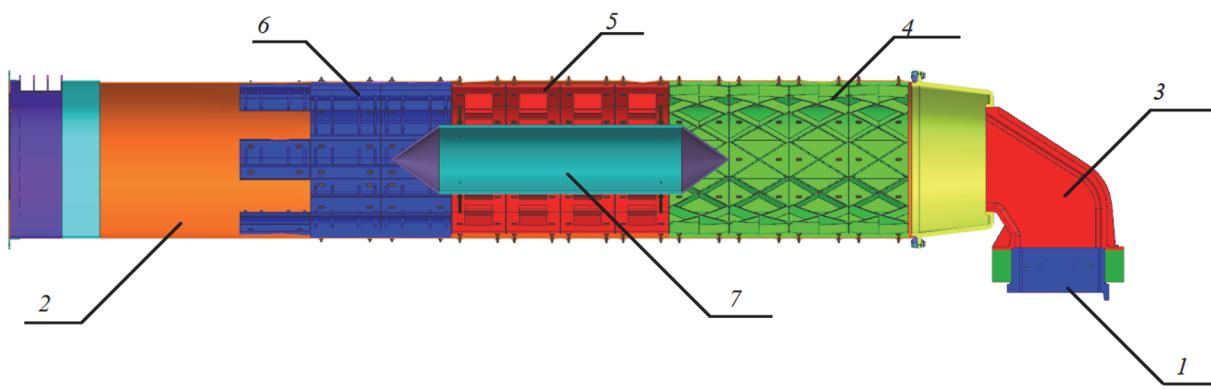


Рисунок 3. — Установка рекуператорного охладителя



1 — стакан; 2 — корпус; 3 — лейка; 4, 6 — бронеплита; 5 — конус;
6 — бронеплита; 7 — вставка

Рисунок 4. — Рекуператор

В данной цифровой модели применяется вращающаяся печь, оснащенная блоком рекуператоров, в которых установлены специальные цилиндрические вставки 7 и пересыпные полки, которые располагаются внутри, предназначенные для повышения эффективности охлаждения клинкера. Цилиндрические вставки фиксируются на барабане рекуператора с помощью кронштейнов.

Результаты исследования и их обсуждение. Прочностной анализ рекуператорного холодильника выполняется в несколько этапов.

Для расчёта рекуператорных охладителей разрабатывается конечно-элементная модель. Создание конечно-элементной сборки осуществляется с использованием приложения «Пре/постпроцессор» [7].

Первым этапом расчетного процесса является назначение материалов и их физико-механических свойств для электронно-цифровых моделей (рисунок 5) [8; 9].

Следующим шагом происходит создание конечно-элементной сетки для геометрических моделей, участвующих в расчете (рисунок 6).

После создания всех необходимых для расчета конечно-элементных моделей создается конечно-элементная сборка (рисунок 7).

В соответствии с расчётной схемой (рисунок 8) определено, что основными нагрузками, действующими на рекуператор, является собственный вес, вес бронеплит и материалов (таблица 1).

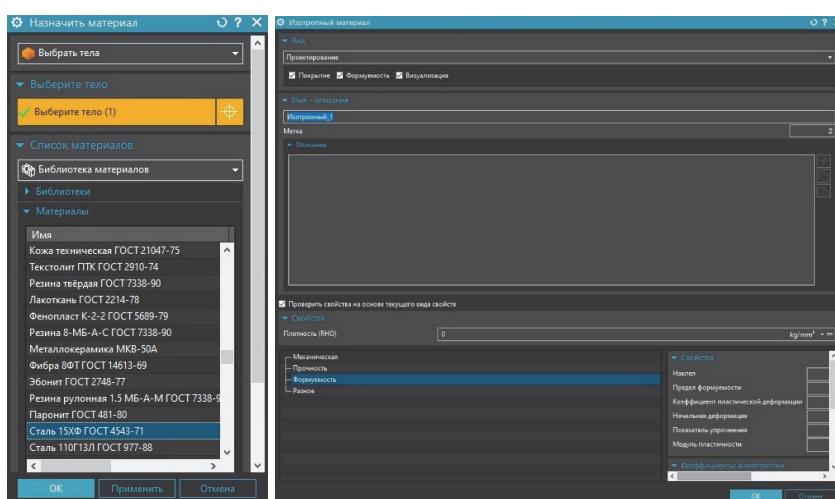


Рисунок 5. — Создание и назначение материала

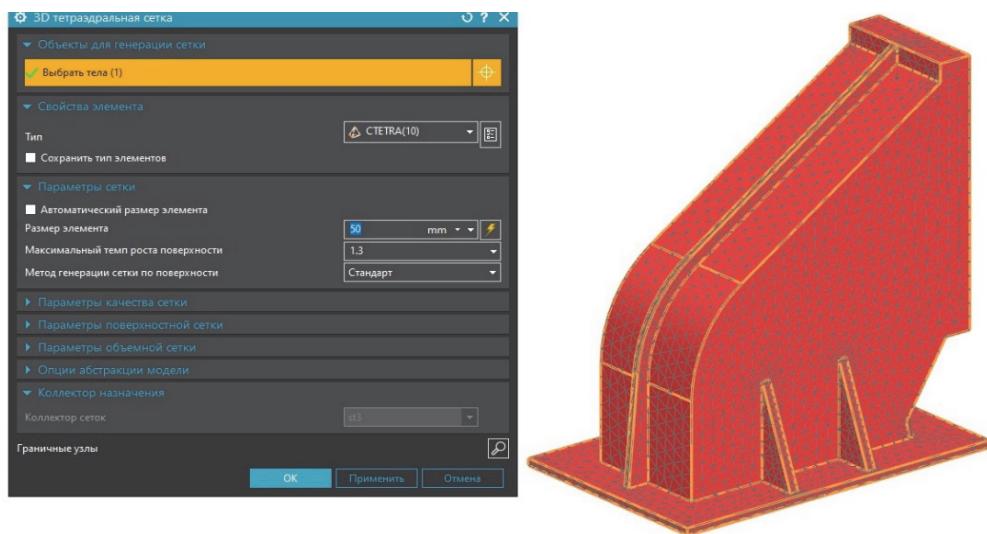


Рисунок 6. — Создание конечно-элементной сетки на модель

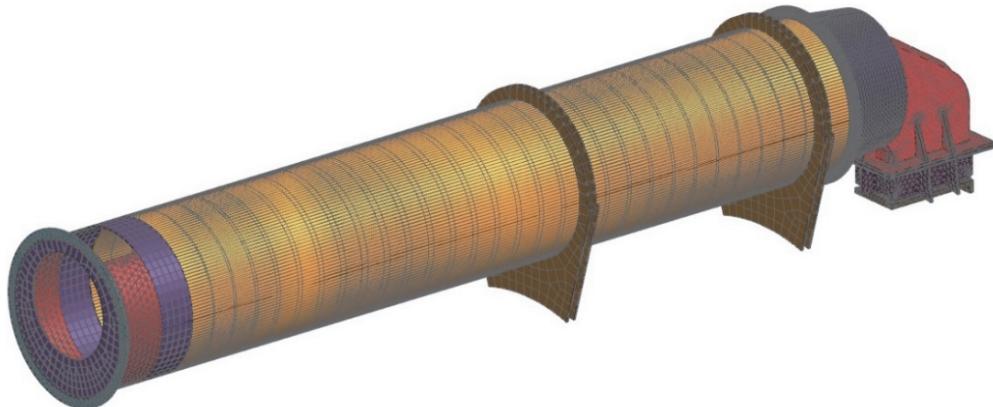


Рисунок 7. — Подготовка конечно-элементной сборки для симуляции

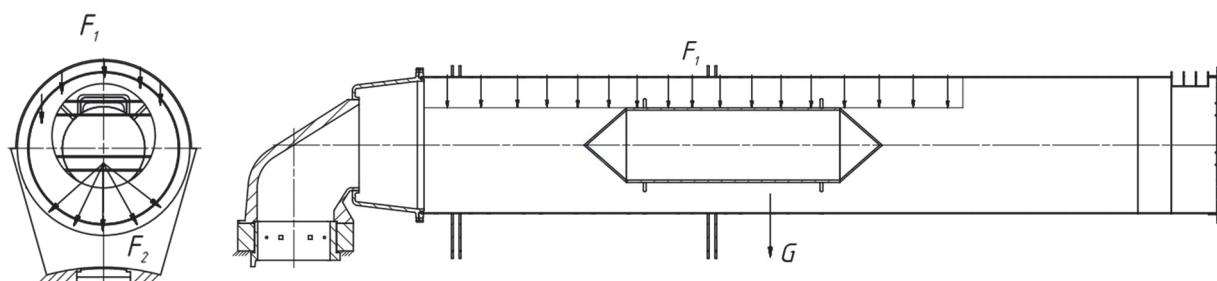


Рисунок 8. — Расчетная схема

Т а б л и ц а 1. — Нагрузки

Наименование	Обозначение	Значение, Н
Собственный вес	G	75 702
Вес бронеплит	F1	95 805
Вес материала	F2	12 760

На основании расчётной схемы выполняется разработка моделей симуляции (рисунок 9) и задание граничных условий, таких как нагрузки, закрепления и взаимодействие между конечно-элементными моделями.

Далее выполняется анализ результатов прочностного расчёта. На рисунках 10 и 11 представлены диаграмма распределения перемещений и диаграмма распределения напряжений по Мизесу [7].

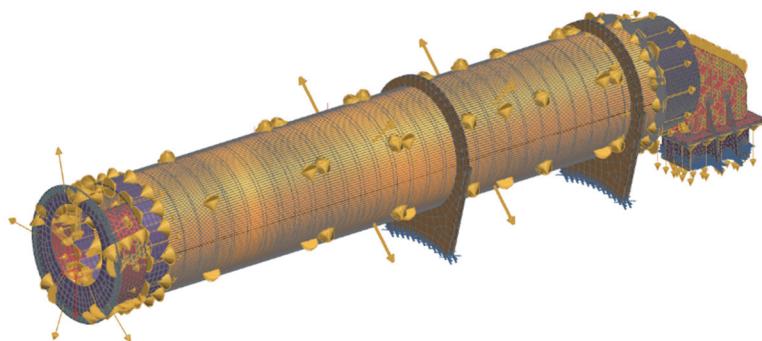


Рисунок 9. — Процесс задания нагрузок, склеивания и ограничения

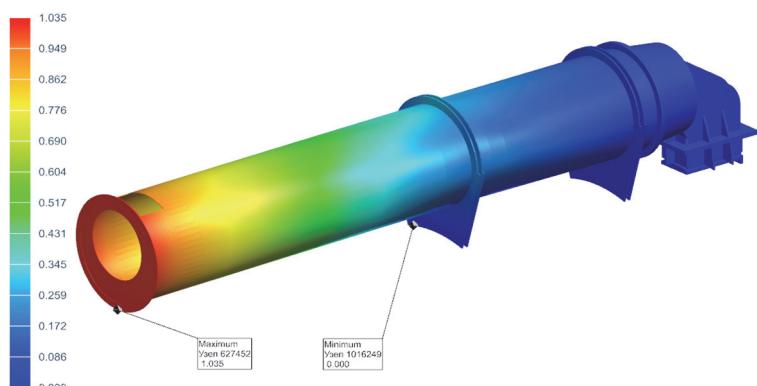


Рисунок 10. — Диаграмма распределения перемещений

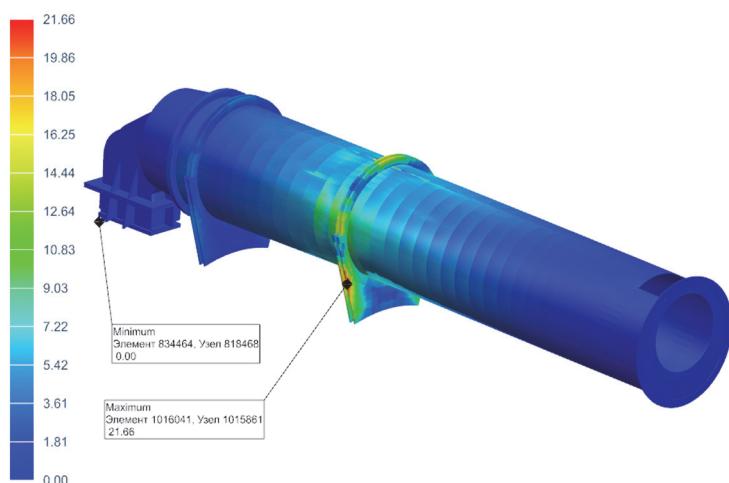


Рисунок 11. — Диаграмма распределения напряжений по Мизесу

Заключение. Работоспособность конструкции рекуператора обеспечивается при соблюдении требований к прочности и жесткости.

Прочностной расчет предполагает сравнение максимальных расчетных напряжений с допускаемыми значениями для выбранного материала и определение коэффициента запаса прочности:

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max}} \geq [n],$$

где n — коэффициент запаса прочности;

$[\sigma]$ — допускаемые напряжения для выбранного материала;

σ_{\max} — максимальные расчетные напряжения;

$[n]$ — допускаемый коэффициент запаса прочности, $[n] = 1,5 \dots 2,4$ [10; 11].

Условия жесткости — это сравнение максимальных перемещений с допускаемыми:

$$\delta_{\max} \leq [\delta],$$

где δ_{\max} — максимальные расчетные перемещения;

$[\delta]$ — допускаемые перемещения, $[\delta] = \frac{1}{250}a$, где a — габаритный размер конструкции.

Выполняется проверка условий прочности и жесткости для корпуса рекуператора ($\sigma_{\max} = 24 \text{ МПа}$, $[\sigma] = 420 \text{ МПа}$, $a = 8160 \text{ мм}$, $\delta_{\max} = 1,042 \text{ мм}$); $n = \frac{410}{24} = 17,08 \geq 1,5$.

Условие прочности выполняется.

$$[\delta] = \frac{1}{250} \cdot 10500 = 42 \text{ мм}; 1,042 \leq 42.$$

Условие жесткости выполняется.

Проведенный расчет прочностных характеристик рекуператора позволил определить, что он обладает достаточным коэффициентом запаса прочности при повышении производительности вращающейся печи — 20 % [11; 12].

Список цитируемых источников

1. Копелиевич, В. М. Топливо цементной промышленности. — М. : Стройиздат, 1984. — 160 с.
2. Нусс, М. В. Управление работой цементной вращающейся печи / М. В. Нусс, П. А. Трубаев, В. К. Классен // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2013. — № 1. — С. 61—65.
3. NX для конструктора машиностроителя / П. С. Гончаров, М. Ю. Ельцов, С. Б. Коршиков [и др.]. — М. : ДМК Пресс, 2010. — 504 с.
4. Печные агрегаты цементной промышленности / С. Г. Силенок, Ю. С. Гризак, В. Н. Лямин [и др.]. — М. : Машиностроение, 1994. — 168 с.
5. Лисиенко, В. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология : в 2 кн. / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. — М. : Теплотехник, 2004. — 687 с.
6. Хородов, Е. И. Печи цементной промышленности / Е. И. Хородов. — 2-е изд. — Л. : Изд-во лит. по строительству, 1968. — 450 с.
7. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ / П. С. Гончаров, И. А. Артамонов, Т. Ф. Халитов [и др.]. — М. : ДМК Пресс, 2012. — 504 с.
8. Данилов, Ю. Практическое использование NX / Ю. Данилов, И. Артамонов. — М. : ДМК Пресс, 2011. — 332 с.
9. Проектирование в NX под управлением Teamcenter / М. Ю. Ельцов, А. А. Козлов, А. В. Седойкин, Л. Ю. Широкова. — 2-е изд. — М. : ДМК Пресс, 2023. — 753 с.

10. *Фадин, Ю. М.* Теоретические основы расчета технологических комплексов производства строительных материалов и изделий : учеб. пособие / Ю. М. Фадин, А. С. Ильин. — Белгород : Изд-во БГТУ им. Шухова, 2010. — 173 с.
11. *Кузнецов, Н. В.* Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). — М. : Энергия, 1973. — 296 с.
12. *Классен, В. К.* Технология и оптимизация производства цемента / В. К. Классен ; БГТУ им. В. Г. Шухова. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2012. — 307 с.

Поступила в редакцию 27.03.2025.

А. Н. Матяс¹,А. М. Милюкова², кандидат технических наук, доцент,В. В. Малеронок³, кандидат технических наук, доцент^{1,2}Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларусь»,

ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 367 60 10, priemnaya@phti.by

³Белорусская государственная академия авиации, ул. Уборевича, 77, 220096 Минск, Республика Беларусь

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ANSYS И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ СИСТЕМЫ «ИНДУКТОР—ИЗДЕЛИЕ»

Исследовательская работа направлена на анализ результатов численного моделирования процесса упрочняющей магнитно-импульсной обработки плоского режущего инструмента с помощью программного обеспечения ANSYS. Опираясь на полученные результаты, поставлена цель выработать практические рекомендации по взаимному расположению обрабатываемого изделия по отношению к индуктору для более эффективного упрочнения.

С использованием модуля Ansys Electronics Desktop (Maxwell) получено распределение индукционных токов на поверхности куттерного ножа с режущей кромкой, помещенного на плоский индуктор в трех вариантах расположения. Результаты моделирования напряженности магнитного поля ($H_{0,1}$), которые определялись на глубине 0,1 мм от поверхности режущего инструмента, показаны для вариантов расположения: кромка на краю — $1,703 \cdot 10^6$ А / м; кромка через середину — $2,793 \cdot 10^6$ А / м; кромка симметрично диаметра — $2,026 \cdot 10^6$ А / м. Анализ плотности вихревых токов ($J_{0,1}$) при магнитно-импульсной обработке на режущей кромке куттерного ножа по линии измерения 0,1 мм от его поверхности составил: кромка на краю — $0,979 \cdot 10^8$ А / м²; кромка через середину — $7,9 \cdot 10^8$ А / м²; кромка симметрично диаметра — $7,230 \cdot 10^8$ А / м². Определены оптимальные варианты расположения ножа на индукторе. Поскольку магнитно-импульсная обработка — процесс циклический, а результаты последующих циклов зависят от результата обработки предыдущими циклами, то вариант «кромка симметрично диаметра» расположением плоского ножа представляется более выгодным, так как остаточный объемный нагрев у такого варианта ожидается выше, чем у других вариантов взаимного расположения инструмента на индукторе.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка; 3D-моделирование; программное обеспечение ANSYS; индукционный ток; напряженность магнитного поля; плоский режущий инструмент; расположение изделия.

Рис. 11. Библиогр.: 4 назв.

A. N. Matsias¹,A. M. Miliukova², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,V. V. Maleronomok³, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

^{1,2}State 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, priemnaya@phti.by

³Belarusian State Aviation Academy, 77 Uborevicha Str., 220096 Minsk, the Republic of Belarus

NUMERICAL SIMULATION OF HARDENING MAGNETIC-PULSE TREATMENT OF A FLAT CUTTING TOOL IN ANSYS AND DETERMINATION OF THE RELATIVE POSITION OF THE “INDUCTOR—PRODUCT” SYSTEM

The objective of the present research is to analyse the numerical simulation results of the hardening magnetic-pulse treatment process of a flat cutting tool using ANSYS software. The objective is to formulate pragmatic recommendations for the relative positioning of the treated product in relation to the inductor, with the aim of enhancing the effectiveness of the hardening process.

The distribution of induced currents on a cutter knife surface with a cutting edge placed on a flat inductor with three configurations of the edge position has been obtained using the Ansys Electronics Desktop (Maxwell) module. The simulation results of the magnetic field strength ($H_{0,1}$), which have been determined at a depth of 0.1 mm from the cutting tool surface, are shown for the following configurations: edge at the edge — $1.703 \cdot 10^6$ А / м; edge through the middle — $2.793 \cdot 10^6$ А / м; edge symmetrically to the diameter — $2.026 \cdot 10^6$ А / м. The analysis of the eddy current

density ($J_{0,1}$) during the magnetic-pulse treatment (MPT) on the cutting edge of the cutter knife along the measurement line of 0.1 mm from its surface is as follows: for the edge at the edge configuration — $0.979 \cdot 108 \text{ A} / \text{m}^2$; edge through the middle — $7.9 \cdot 108 \text{ A} / \text{m}^2$; edge symmetrical to the diameter — $7.230 \cdot 108 \text{ A} / \text{m}^2$. The optimal configurations of the knife position on the inductor have been determined: edge through the middle and edge symmetrical to the diameter. Given that MPT is a cyclic process, and the results of subsequent cycles are contingent on the outcomes of previous cycles, the configuration of the edge symmetrical to the diameter with the flat knife position appears to be more advantageous. This is due to the expectation that the residual volumetric heating for this configuration will exceed that of the other configurations for the mutual tool position on the inductor.

Key words: magnetic pulse treatment; 3D modeling; ANSYS software; induction current; magnetic field strength; flat cutting tool; product location.

Fig. 11. Ref.: 4 titles.

Введение. Практическое использование энергии импульсных электромагнитных полей открывает исключительные перспективы для создания новой и современной технологии по обработке изделий из различного рода сталей и сплавов.

Магнитно-импульсная обработка (далее — МИО) металлов характеризуется тем, что на деформируемую металлическую заготовку создается определенное давление непосредственно воздействием импульсного магнитного поля без участия промежуточных твердых, жидких или газообразных сред [1; 2].

В настоящее время существует широкая гамма оборудования для МИО, которое подразделяется на группы в зависимости от запасаемой энергии, частоты разряда и производительности. По конструктивному оформлению установки охватывают широкий диапазон применения, различаются незначительно. Однако по своим характеристикам (энергии, частоте, напряженности магнитного поля, длительности импульса) имеют отличия. По сравнению с установками для формообразования под действием импульсного магнитного поля для упрочнения используется оборудование с меньшей частотой и энергией воздействия, длительностью импульса и величиной напряженности магнитного поля [3].

Выбор того или иного метода магнитной обработки существенно зависит от обрабатываемого изделия: его размера, геометрических особенностей, марки стали, нагрузок, действующих на изделие в процессе работы, от конструктивного и технического исполнения установок для импульсной обработки.

Одной из основных проблем при упрочнении является подбор оптимальных режимов для выполнения обработки, поскольку он связан с проведением массы испытаний, при которых вариируются различные параметры процесса МИО: энергия импульса, ток разряда, размеры индуктора, количество импульсов и т. д. Это приводит к увеличению времени для исследований и определенных трудностей, связанных с задействованием производственных мощностей при проведении эксперимента. Кроме того, основываясь на ранее полученных результатах исследований в области МИО изделий, обрабатываемых на плоских индукторах, установлено, что эффект упрочнения зависит от взаимного расположения изделия относительно индуктора. Эта закономерность наблюдается в основном при обработке габаритных изделий, которые охватывают всю рабочую поверхность спирали индуктора. Как указывалось выше, экспериментально проверить данную теорию весьма затруднительно, поэтому необходимо прибегнуть к другому методу — моделированию.

Научно обоснованным решением является использование имитационного моделирования для оценки конструкторских решений и анализа результатов процессов упрочняющей МИО. Использование программного обеспечения ANSYS для технического анализа и численного моделирования позволяет получать количественные результаты изучаемых процессов, обеспечивает понимание физики моделируемых процессов, высокий уровень наглядности и т. д. [4].

Следовательно, основная цель моделирования — расширить понимание процесса МИО на примере плоского режущего инструмента, осуществить вариацию параметров моделирования и на начальной стадии разработать методику выбора оптимального взаимного расположения готового изделия по отношению к индуктору, чтобы повысить эффективность упрочнения методом МИО.

Материалы и методы исследования. В качестве основного технологического оборудования для проведения обработки и моделирования будет использоваться магнитно-импульсная установка (МИУ) МИП-18, изготовленная в государственном научном учреждении «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларусь».

Представленная установка характеризуется как высокоенергетическая и высокоскоростная. Длительность единичного импульса магнитного поля при воздействии на образцы в установке находится в интервале от 35 до 200 мкс в зависимости от используемого типа индуктора. Максимальное амплитудное значение напряженности магнитного поля составляет порядка $1,7 \cdot 10^7$ А / м, что соответствует 21 Тл, энергии воздействия до 15 кДж.

Для исследований и обработки использовался плоский индуктор диаметром 150 мм с медной шиной и изоляционным слоем (при моделировании изолирующий слой был представлен воздушным промежутком). Число витков спирали индуктора составляло 18 шт., индуктивность — 25,8 мГн, активное сопротивление — 4 мОм. В качестве обрабатываемого изделия использовался куттерный нож из коррозионностойкой стали 40Х13. Для проведения моделирования выполнено построение 3D-модели куттерного ножа, которая была импортирована из SolidWorks, а индуктор построен в блоке Maxwell. Моделирование проводилось в блоке Ansys Electronics Desktop (Maxwell) — модуль для электромагнитного анализа.

Активное сопротивление R и индуктивность L являются основными электрическими параметрами индуктора и исходными данными для моделирования, которые были получены при лабораторном измерении.

Также для проведения исследований был применен закон изменения напряжения при разряде конденсаторной батареи на индуктор по следующей формуле:

$$U = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t),$$

где U_0 — начальное амплитудное значение напряжения, В;

β — коэффициент затухания;

t — время моделирования, с;

ω — угловая частота, рад / с; $\omega = 2\pi f$, f — частота затухающих колебаний, Гц [4].

Начальное амплитудное значение напряжения $U_0 = 10\,000$ В, согласно техническим характеристикам оборудования для энергии в 10 кДж (энергия обработки), является напряжением заряда конденсаторной батареи. Теоретическое значение коэффициента затухания β принимается равным отношению $R / 2L$. Но это значение не учитывает потери энергии, связанные с рассеиванием магнитного потока и нагревом заготовки. В связи с этим значение коэффициента затухания было определено экспериментально и составило 2 000, чтобы получить один период (T) затухающих колебаний с ослаблением второй полуволны в 1,4...1,5 раза, как в реальных установках для МИО. На рисунке 1 представлена измеренная осциллограмма разрядного импульса, содержащая один период затухающих колебаний. Разряд в индукторе измерялся поясом Роговского.

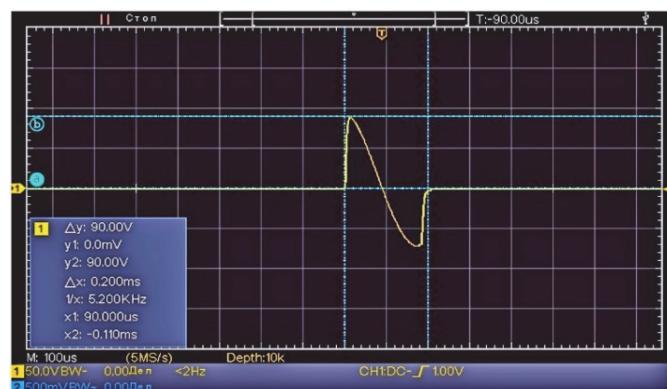


Рисунок 1. — Переходной процесс разряда в индукторе

Частота затухающих колебаний f зависит от конструктивных особенностей МИУ и используемого с ней индуктора. Так, установка МИП-18 с плоским индуктором диаметром 150 мм, согласно технической документации, работает на частоте 5,2 кГц.

Время моделирования t выбирается равным времени релаксации переходного процесса в цепи «конденсатор—индуктор—заготовка» с учетом аппаратной реализации исполнительного механизма разряда в виде разрядника и составляет один период, что обеспечивает достаточную для анализа точность результатов.

Разрядный ток индуктора при расположении на нем ножа рассчитывается в процессе моделирования, как и величина реактивного сопротивления индуктора на указанной частоте.

В результате моделирования получены характеристики переходного процесса разряда конденсатора на индуктор. Результаты представлены в виде графиков затухающих колебаний на рисунке 2.

Процесс затухания происходит за время T , что с учетом равенства $T = 1 / f$ при $f = 5,2$ кГц составляет 192 мкс, а максимальная величина силы тока в момент времени $T / 4 = 48$ мкс. В дальнейшем при моделировании расчет будет производиться для времени 45 мкс, так как шаг моделирования по времени выбран 5 мкс, что позволит сократить количество расчетных точек.

Отображение основных электромагнитных величин (H , J) будет приводиться для времени 45 мкс, где амплитуда разрядного тока максимальна и достигает 10,46 кА, следовательно, значения электромагнитных величин (H , J) будут максимальны.

Для дальнейшего проведения моделирования необходимо построить сетку ножа, индуктора и воздушного пространства по методу конечных элементов (рисунок 3).



Рисунок 2. — Переходный процесс разряда индуктора, полученный в результате моделирования в виде графиков затухающих колебаний тока (I) и напряжения (U)

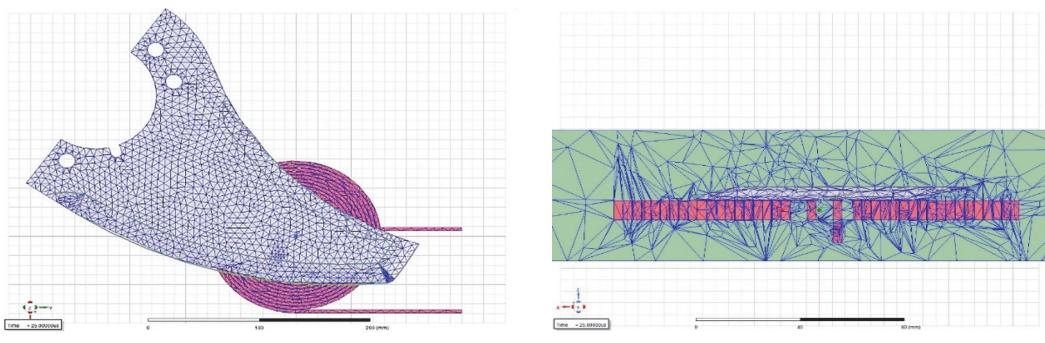


Рисунок 3. — Сетка ножа (а), индуктора и воздушного пространства (б)

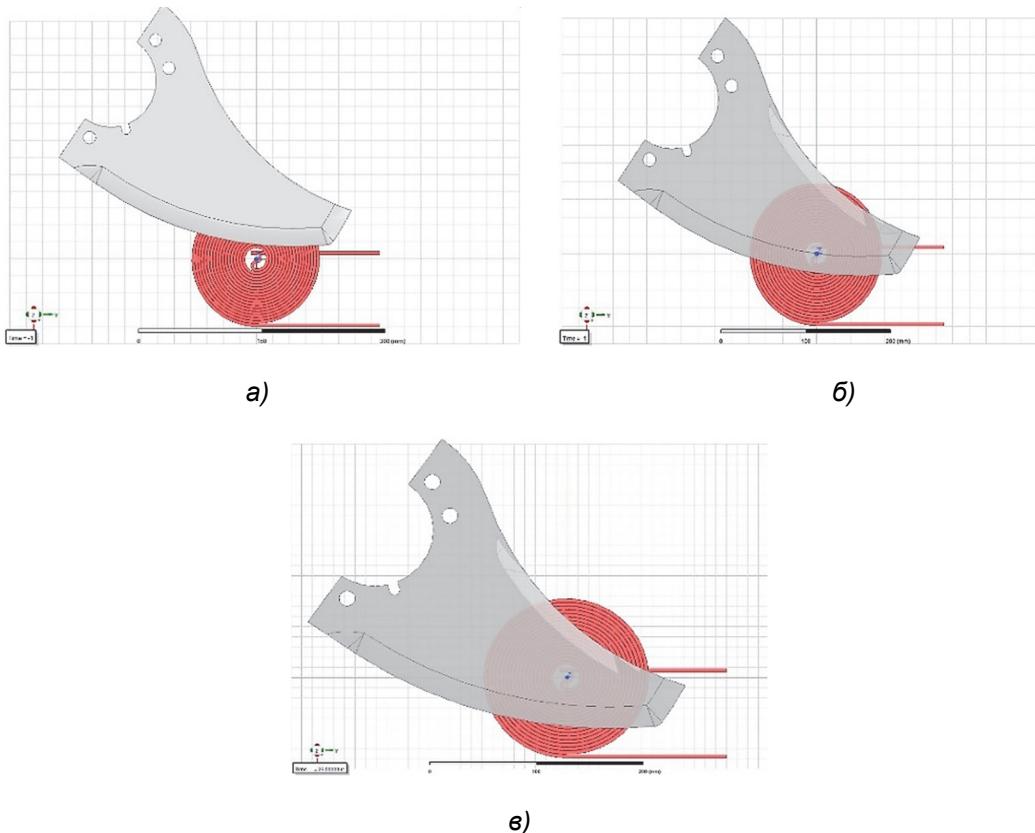
Результаты исследования и их обсуждение. Для исследований была принята компоновка, представленная на рисунке 4.

Рассмотрены три варианта взаимного расположения ножа относительно индуктора в целях установления наиболее энергетически выгодного магнитно-импульсного воздействия на обрабатываемое изделие.

Измерения напряженности проводили по пяти диаметральным линиям на высоте 0,1; 0,5; 1; 5; 10 мм от плоскости индуктора, как показано на рисунке 5.

Полученные графики распределения напряженности магнитного поля на различной глубине от плоскости индуктора представлены на рисунке 6.

Как видно из графика, по мере удаления от плоскости индуктора величина напряженности магнитного поля уменьшается, а максимум смещается к краю.



а — кромка на краю; б — кромка через середину; в — кромка симметрично диаметру

Рисунок 4. — Взаимное расположение изделия по отношению к спирали индуктора

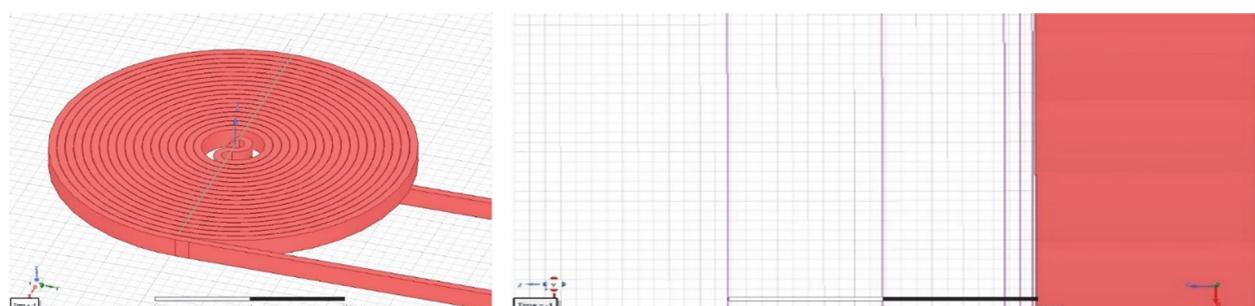


Рисунок 5. — Диаметральные линии на высоте 0,1; 0,5; 1; 5; 10 мм от плоскости индуктора

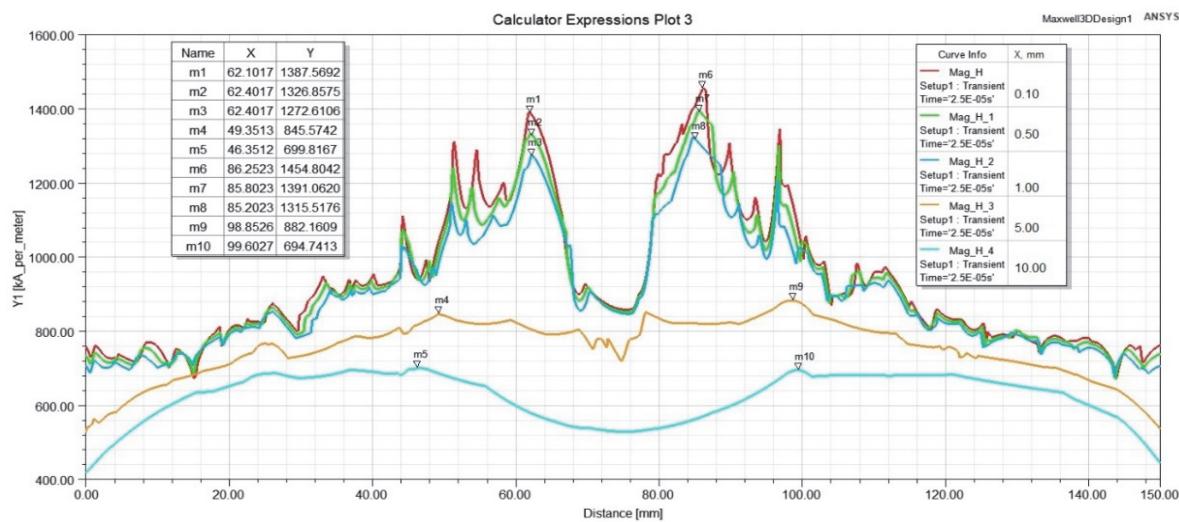


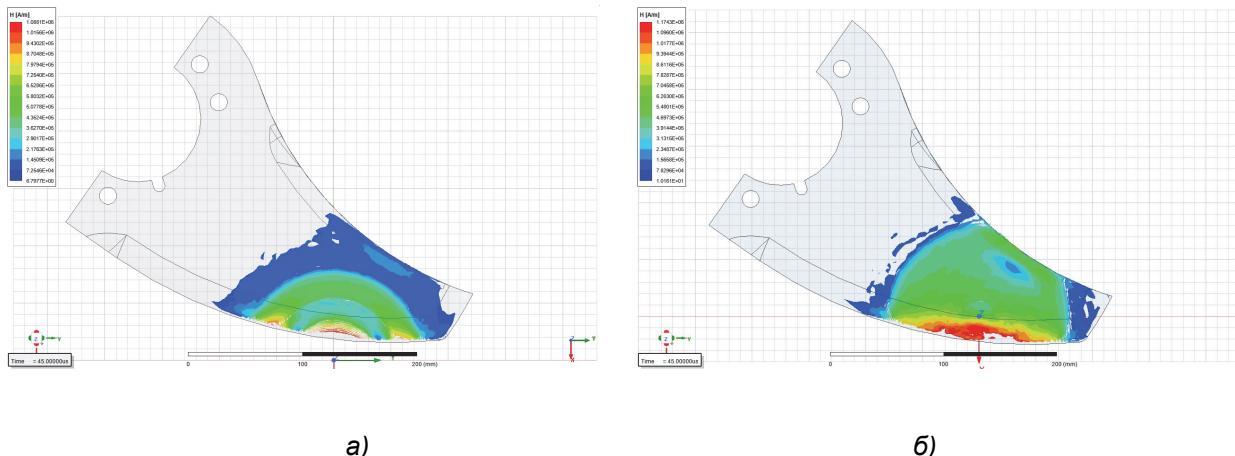
Рисунок 6. — Напряженность магнитного поля на высоте 0,1; 0,5; 1; 5; 10 мм от плоскости индуктора

В результате моделирования получены основные значения электромагнитных величин (H, J) для трех вариантов взаимного расположения индуктора и ножа.

Распределение электромагнитных величин (H, J) оценивалось по объему и сечению ножа, а численные значения — по диаметральной линии на глубине 0,1 мм от обрабатываемой поверхности ножа, которая находится непосредственно на индукторе. При всех исследованиях нож находился на высоте 0,5 мм над поверхностью индуктора, что соответствует толщине изоляции между индуктором и обрабатываемым изделием.

Распределение напряженности магнитного поля на исследуемом изделии представлено на рисунке 7.

Значения напряженности по линии измерения на глубине 0,1 мм от поверхности ножа представлены на рисунке 8.



a — вид сверху, кромка на краю; *б* — вид сверху, кромка через середину; *в* — вид сверху, кромка симметрично диаметра; *г* — сторона ножа к индуктору, кромка на краю; *д* — сторона ножа к индуктору, кромка через середину; *е* — сторона ножа к индуктору, кромка симметрично диаметра; *ж* — сечение, кромка на краю; *з* — сечение, кромка через середину; *и* — сечение, кромка симметрично диаметра

Рисунок 7. — Распределение напряженности магнитного поля на поверхности обрабатываемого изделия при различных вариантах расположения

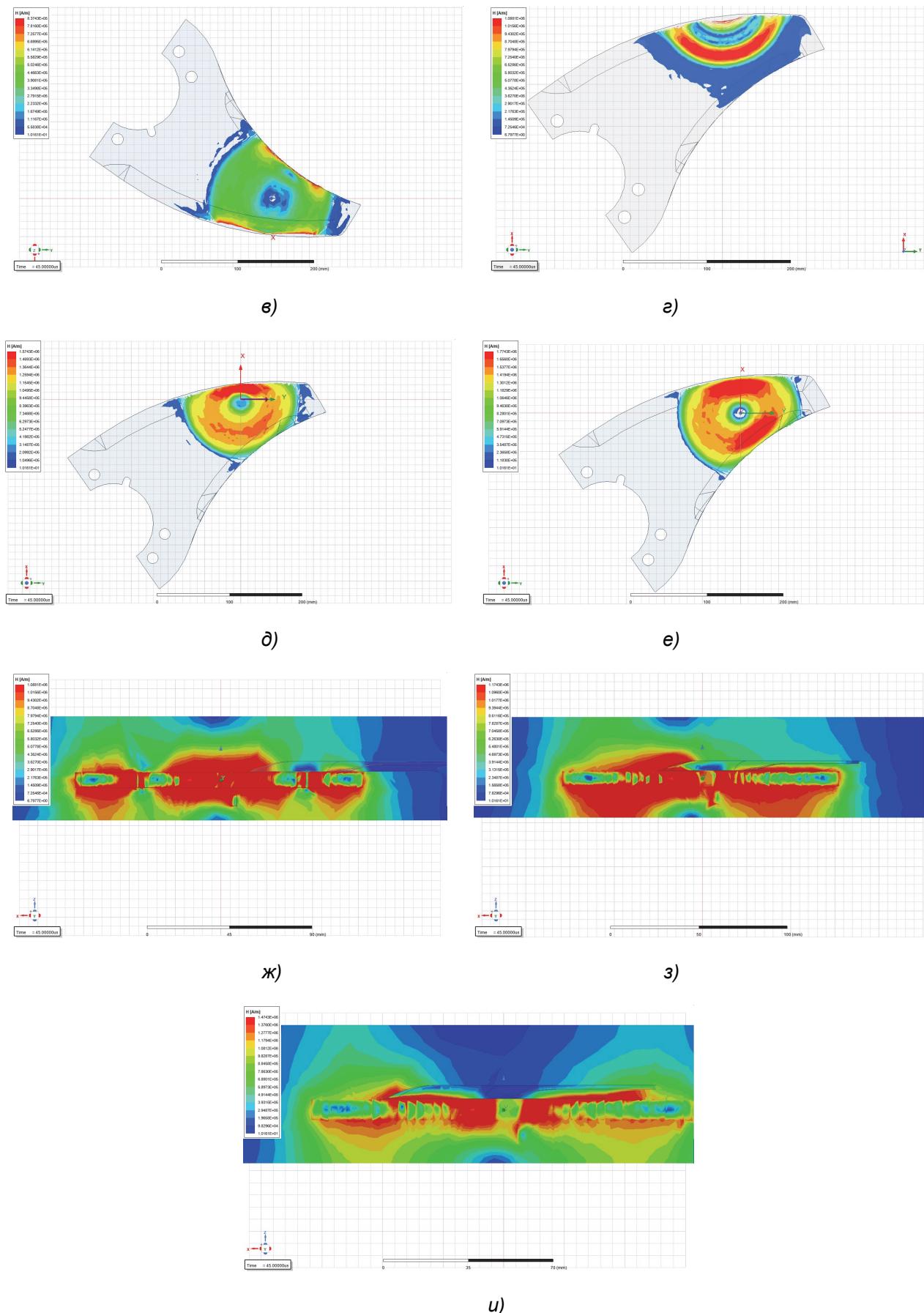
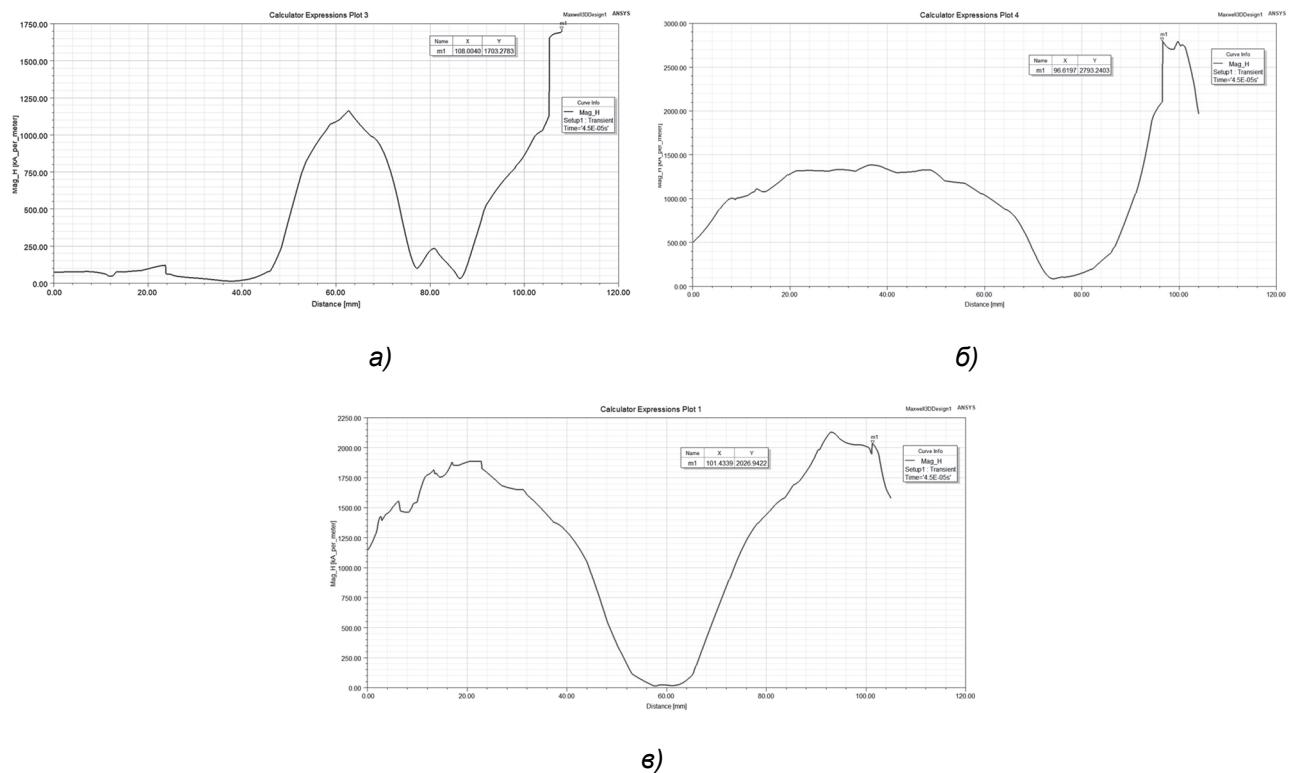


Рисунок 7. — Окончание



а — кромка на краю; б — кромка через середину; в — кромка симметрично диаметру

Рисунок 8. — Графики определения напряженности магнитного поля при различных вариантах расположения ножа по отношению к индуктору

Значения напряженности магнитного поля ($H_{0,1}$) при МИО на режущей кромке куттерного ножа по линии измерения 0,1 мм от его поверхности составили: кромка на краю — $1,703 \cdot 10^6$ А / м; кромка через середину — $2,793 \cdot 10^6$ А / м; кромка симметрично диаметру — $2,026 \cdot 10^6$ А / м.

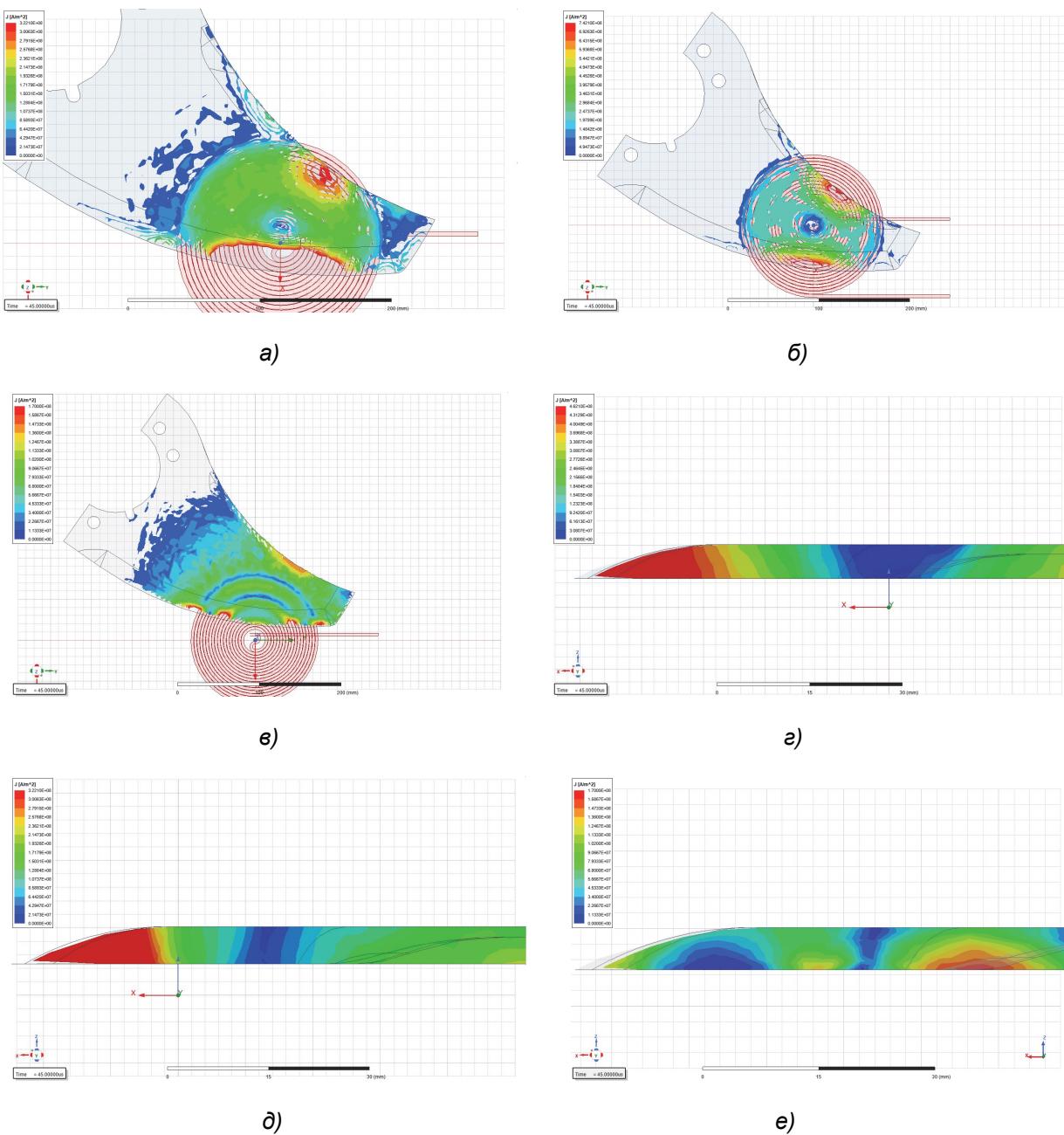
Таким образом, по графику, представленному на рисунке 8, можно сделать вывод, что значение напряженности, следовательно, и индукция больше у варианта «кромка через середину», однако, оценивая распределение напряженности по объему, видим, что у варианта «кромка через середину» наблюдается большая однородность магнитного поля по сравнению с остальными вариантами, что напрямую повлияет на распределение плотности вихревого индукционного тока.

Дальнейшим этапом исследования было определение распределения плотности вихревого тока при МИО (рисунок 9).

Значения плотности вихревого тока по линии измерения на глубине 0,1 мм от поверхности ножа представлены на рисунке 10.

Значения плотности вихревых токов ($J_{0,1}$) при МИО на режущей кромке куттерного ножа по линии измерения 0,1 мм от его поверхности составили: кромка с краю — $0,979 \cdot 10^8$ А / м²; кромка через середину — $7,9 \cdot 10^8$ А / м²; кромка симметрично диаметру — $7,230 \cdot 10^8$ А / м².

Полученные результаты свидетельствуют о том, что большее значение имеет величина плотности вихревого тока у варианта с установкой кромки через середину, однако у варианта расположения ножа «кромка симметрично диаметру» наблюдается распределение плотности вихревого индукционного тока с высоким порядком ее значения по максимальному объему обрабатываемой области инструмента (это видно по распределению плотности на объемных рисунках и из графика по площади, ограниченной им, особенно в области режущей кромки), чем у других вариантов взаимного расположения индуктора и изделия.

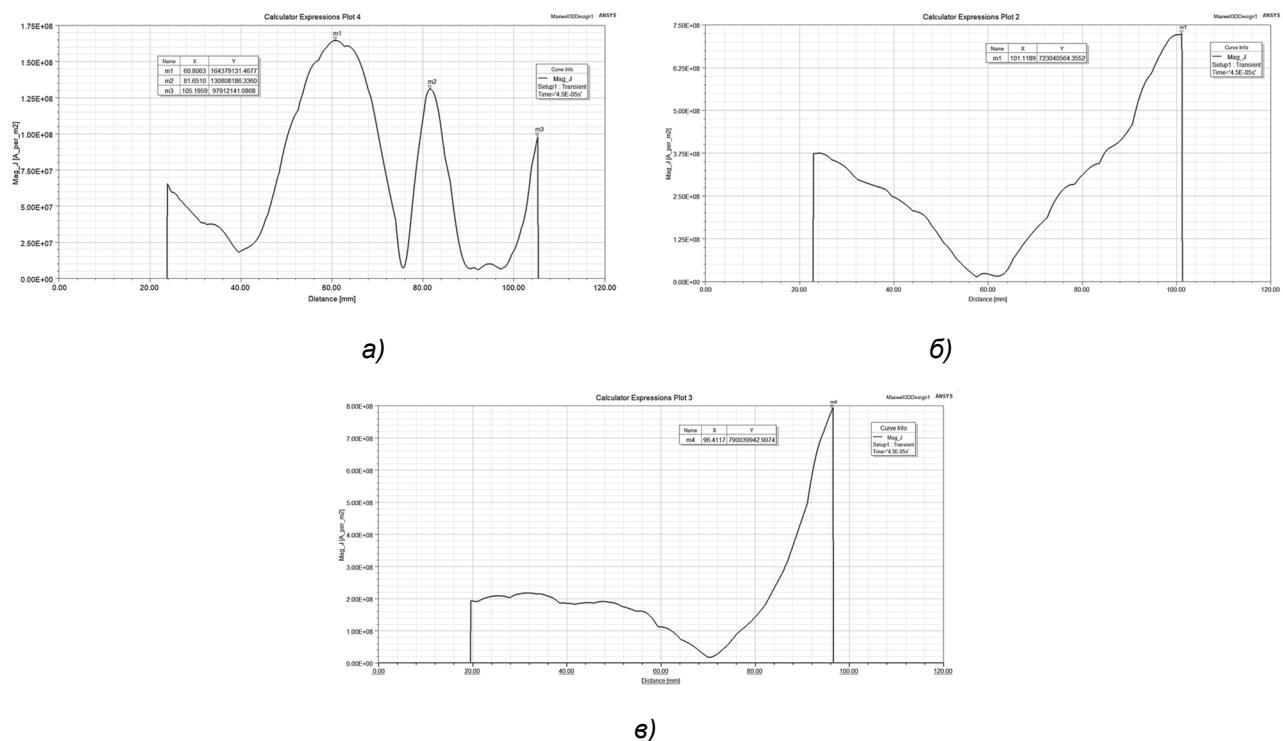


а — вид сверху, кромка на краю; *б* — вид сверху, кромка через середину; *в* — вид сверху, кромка симметрично диаметру; *г* — сечение, кромка на краю; *д* — сечение, кромка через середину; *е* — сечение, кромка симметрично диаметру

Рисунок 9. — Распределение плотности вихревого тока на поверхности обрабатываемого изделия при различных вариантах расположения

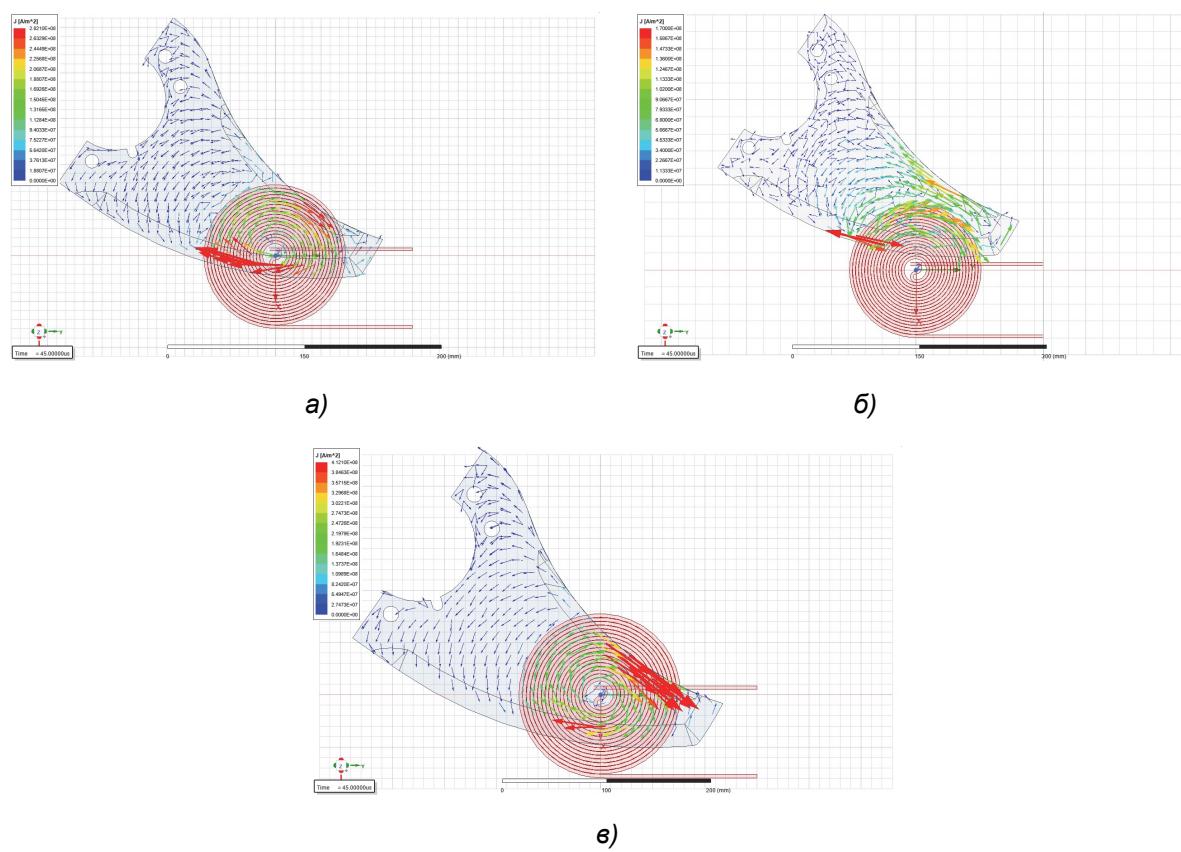
Вариант расположения ножа кромкой на краю является энергетически невыгодным и может быть применен только для локальной обработки или дополнительной обработки требуемого участка или узкого инструмента, который рекомендуется обрабатывать в цилиндрическом индукторе, когда расположение над зоной центрального отверстия индуктора, где напряженность поля минимальна, недопустимо, так как приведет к появлению большой необрабатываемой области.

Такое распределение плотности вихревого индукционного тока объясняется тем, что при внесении ножа в импульсное электромагнитное поле индуктора его магнитопроводный материал выступает в качестве магнитопровода, при этом взаимное расположение изделия и индуктора сильно влияет на протекание образующегося вихревого индукционного тока, векторное изображение которого представлено на рисунке 11.



а — кромка на краю; *б* — кромка через середину; *в* — кромка симметрично диаметру

Рисунок 10. — Графики определения значения плотности вихревых токов при различных вариантах расположения ножа по отношению к индуктору



а — кромка на краю; *б* — кромка через середину; *в* — кромка симметрично диаметру

Рисунок 11. — Векторное изображение силовых линий магнитного поля обрабатываемого изделия при различных вариантах расположения

Таким образом, по результатам проведенного численного моделирования можно сделать следующие выводы.

При расположении режущей кромки куттерного ножа на краю индуктора большая его часть оказывается вне зоны действия магнитного поля. При этом наблюдается сильная асимметрия в пути протекания индукционного тока, отличная от кольцевой (так как плоский индуктор имеет форму круга). Следовательно, происходит сильное ослабление вихревого индукционного тока.

При размещении режущей кромки через середину индуктора в первой трети витков большая часть изделия выступает в качестве концентратора магнитного поля с одной стороны от диаметральной линии индуктора, во второй трети происходит уменьшение площади магнитопровода, следовательно, уменьшение области замыкания кольцевых линий индукционного тока.

У варианта расположения ножа «кромка симметрично диаметру» с расположением кромки в первых двух третях витков от центра индуктора наблюдается образование симметричных кольцевых линий протекания вихревого индукционного тока (так как индуктор круглый плоский), следовательно, наблюдается равномерность огибания периметра изделия с одинаковым воздействием на большую обрабатываемую область.

Заключение. Для плоских изделий (в основном для режущих инструментов) определение эффективности МИО является достаточно трудоемкой вычислительной задачей. В результате проведенного численного моделирования влияния МИО на плоский куттерный нож были рассмотрены три варианта взаимного расположения индуктора и ножа в целях установления наиболее энергетически выгодного воздействия на обрабатываемое изделие.

Исследование напряженности магнитного поля ($H_{0,1}$) при МИО на режущей кромке куттерного ножа по линии измерения 0,1 мм от его поверхности показало, что значение больше у варианта «кромка через середину», однако, оценивая распределение напряженности по объему, можно заметить, что у варианта расположения ножа, где кромка расположена симметрично диаметру, наблюдается большая однородность магнитного поля по сравнению с остальными вариантами.

Полученные результаты величины плотности вихревого тока свидетельствуют о том, что большим значениям соответствует расположение ножа с установкой кромки через середину, однако у варианта диаметрально симметричного расположения ножа наблюдается распределение плотности вихревого индукционного тока с высоким порядком ее изменения по максимальному объему обрабатываемой области инструмента. Такое распределение плотности вихревого индукционного тока объясняется тем, что при внесении ножа в импульсное электромагнитное поле индуктора его магнитопроводный материал выступает в качестве магнитопровода.

Следует отметить, что так как вихревой индукционный ток (показатели: сила и плотность тока) является генератором тепловой энергии в обрабатываемом изделии, то при моделировании тепловых процессов ожидается распределение температуры по объему инструмента пропорционально распределению плотности индукционного тока. Следовательно, ожидается более высокий локальный нагрев у варианта с расположением режущей кромки через середину индуктора в первой трети витков, а объемный нагрев — у варианта расположения ножа «кромка симметрично диаметру» с установкой кромки в первых двух третях витков индуктора.

Так как МИО — процесс циклический (итерационный), а результат последующих циклов зависит от результата обработки предыдущими циклами, то вариант с расположением ножа «кромка симметрично диаметру» представляется более выгодным, так как остаточный объемный нагрев у такого варианта ожидается выше, чем у других вариантов взаимного расположения индуктора и инструмента.

Список цитируемых источников

1. Драгобецкий, В. В. Новые и высокоэффективные технологии в машиностроении : учеб. пособие / В. В. Драгобецкий, А. Д. Коноваленко, В. Г. Загорянский. — Харьков : Точка, 2012. — 238 с.
2. Малыгин, Б. В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. — М. : Машиностроение, 1989. — 112 с.
3. Матяс, А. Н. Разработка экспериментального оборудования для нового метода магнитно-импульсной обработки с независимым регулированием длительности импульса / А. Н. Матяс, А. А. Лях. — Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». — 2023. — № 2 (14). — С. 16—27.
4. Малеронок, В. В. Численное моделирование процесса магнитно-импульсной обработки осевого режущего инструмента в Ansys / В. В. Малеронок, Д. А. Ционенко, А. В. Алифанов // Доклады Национальной академии наук Беларуси. — 2022. — Т. 66, № 2. — С. 237—246.

Поступила в редакцию 08.04.2025.

А. М. Милюкова, кандидат технических наук, доцент,

А. В. Алифанов, доктор технических наук, профессор,

В. С. Голубев, кандидат технических наук, доцент,

А. А. Лях,

О. А. Толкачева,

А. Н. Матяс

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук

Беларусь», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь,

+375 (17) 367 60 10, +375 (17) 361 55 52, priemnaya@phti.by, milykova@phti.by

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ СТАЛИ МЕТОДОМ КОМБИНИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ И МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТОК

Проведены исследования механических свойств образцов двух марок сталей до и после проведения комбинированной упрочняющей обработки. Она состояла последовательно из термической, лазерной и магнитно-импульсной обработок при различных технологических режимах. Показано, что комбинация из упрочняющих методов при определенных параметрах режимов позволяет улучшить механические свойства поверхности (твёрдость, износостойкость, суммарные макронапряжения) и микроструктуру конструкционной и инструментальной стали. Применение различных параметров лазерной обработки показало, что точный контроль параметров лазера (мощность, скорость сканирования и перекрытие луча) имеет решающее значение для достижения желаемого результата упрочнения.

Ключевые слова: комбинированная обработка; лазер; магнитно-импульсное поле; сталь 45; сталь X12M; образцы; технологический режим; энергия; импульс; скорость луча; мощность; микроструктура; фазовые превращения; упрочнение.

Рис. 7. Табл. 2. Библиогр.: 2 назв.

A. M. Miliukova, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

A. V. Alifanov, DSc in Technical Sciences, Professor,

B. C. Golubev, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

А. А. Лях,

О. А. Толкачева,

А. Н. Матяс

State 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, +375 (17) 361 55 52, priemnaya@phti.by, milykova@phti.by

IMPROVING THE PROPERTIES OF STEEL BY COMBINING LASER AND MAGNETIC PULSE TREATMENTS

An investigation into the mechanical properties of two steel grades, prior to and following a combined hardening treatment was conducted. The treatment sequence involved thermal, laser and magnetic-pulse treatments, utilising distinct technological modes. The findings demonstrate that the integration of hardening methodologies at specific parameter values enables the enhancement of the mechanical properties of the surface (hardness, wear resistance, total macro stresses) and the microstructure of structural and tool steel. The application of diverse laser processing parameters has demonstrated that precise control of laser parameters (power, scanning speed and beam overlap) is paramount to achieving the desired result of hardening.

Key words: combined treatment; laser; magnetic-pulse field; steel 45; steel X12M; samples; technological mode; energy; pulse; beam speed; power; microstructure; phase pre-turns; hardening.

Fig. 7. Table 2. Ref.: 2 titles.

Введение. Специалистами государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларусь» и учреждения образования «Барановичский государственный университет» разработан комбинированный метод упрочнения

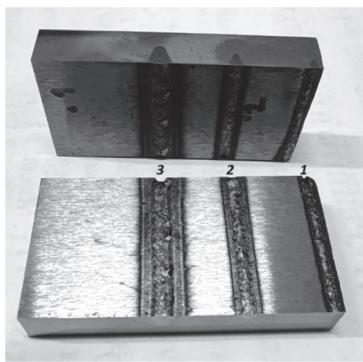
поверхности стальных деталей, включающий кроме традиционной термической дополнительно лазерную обработку и инновационную финишную технологию воздействия электромагнитным импульсным полем — магнитно-импульсную обработку (далее — МИО).

Повышение качества и долговечности выпускаемой предприятиями Беларуси продукции до уровня мировых стандартов требует совершенствования существующих и создания новых технологий, что является одной из актуальных задач науки в производстве. В настоящее время к технологиям предъявляются особые требования по экологичности, ресурсосбережению и др. Проведенные аналитические исследования особенностей термической, лазерной обработок и МИО в целях улучшения эксплуатационных характеристик стальных изделий выявили достоинства и недостатки каждой из них. Широкое применение имеет термическая обработка (ТО): практически все изделия в парах трения или работающих при больших нагрузках, имеющих в том числе ударный характер, как правило, подвергаются поверхностной или объемной ТО. Однако очень часто этого бывает недостаточно для получения необходимых эксплуатационных характеристик изделия, в связи с чем требуется дополнительно применять другие методы создания модифицированных слоев, улучшающих свойства термообработанных поверхностей.

Точный контроль параметров лазера, таких как мощность, скорость сканирования и перекрытие луча, имеет решающее значение для достижения желаемых результатов лазерной обработки [1]. Для высокоеффективной работы необходимы квалифицированные операторы и современные системы мониторинга процесса. Лазерная закалка уменьшает зоны термического влияния по сравнению с традиционными методами, но все же существует риск микроструктурных изменений или нежелательного влияния на свойства материала, например, расплав поверхности слоя и разупрочнение. Тщательный контроль параметров лазера необходим для минимизации этих рисков. Закалка может составлять от нескольких десятков микрометров до нескольких миллиметров. Этого может быть недостаточно для определенных применений, требующих глубокой закалки материала. Для достижения требуемой глубины могут потребоваться альтернативные методы, такие как науглероживание или азотирование. Из-за быстрого нагрева при лазерной закалке существует риск перегрева, если параметры лазера не контролируются должным образом. Это может привести к повреждению детали и снижению производительности. Лазерная закалка более всего подходит для деталей малого и среднего размеров и наиболее целесообразна для локальной закалки определенных участков. Процесс может быть также эффективным, но зачастую более трудоемким для крупногабаритных деталей. В некоторых случаях процесс лазерной закалки может привести к неравномерному упрочнению по всей обрабатываемой поверхности. Это может быть вызвано изменением мощности излучения в процессе обработки, поглощающих свойств материала или несоответствием траектории сканирования лазерного луча.

При воздействии МИО на сталь уплотняются дефекты в кристаллической решетке, снижаются растягивающие или становятся сжимающими суммарные макронапряжения второго рода, измельчается и становится более однородной структура металла [2]. Известно, что под воздействием МИО на поверхности стального изделия образуется упрочненный слой толщиной до 50...300 мкм. Преимуществом МИО по сравнению с известными методами упрочнения является то, что геометрические параметры не меняются, шероховатость поверхности упрочненных изделий может улучшиться, не требуются дополнительные финишные операции, сам процесс отличается низким энергопотреблением, высокой производительностью, экологической чистотой.

Материалы и методы исследования. Для проведения экспериментальных исследований возможности нивелировать недостатки лазерного воздействия путем МИО были изготовлены образцы размером $30 \times 40 \times 5$ мм из сталей 45 и X12M. Образцы из стали 45 были в состоянии поставки твердостью HRB 85...87 (сталь незакаленная), сталь X12M — с твердостью HRB 107.



1 — 8,3 см / с; 2 — 4,6 см / с;
3 — 1,7 см / с

Рисунок 1. — Внешний вид образца стали 45 после обработки лазером мощностью 2 кВт с разными скоростями сканирования лазерного луча

комплексе МГК-1. Испытания на износостойкость проводили на трибометре J&L TECH JLTV-02.

Результаты исследования и их обсуждение. Подготовленные образцы исследованы в исходном состоянии, затем их подвергли обработке лазером мощностью 2 кВт по трем режимам (рисунок 1) и измерили твердость. На поверхности образца стали 45 видны три дорожки различной ширины и глубины воздействия, которые сделаны с разной скоростью сканирования лазерного луча: у дорожки 1 самая малая глубина — 0,5 мм, твердость HRB 120; у дорожки 2 — средняя глубина — 1,5 мм, твердость HRB 100...122, у дорожки 3 — самая большая глубина — 3 мм, твердость HRB 104...109.

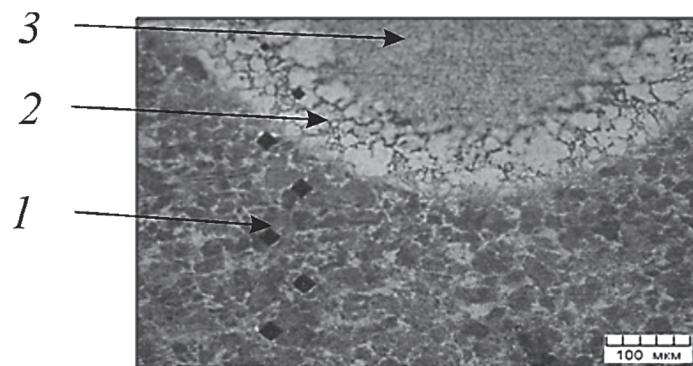
После лазерной обработки образцы подвергли МИО с помощью высокоскоростной установки МИУ-3 на плоском индукторе диаметром 140 мм при частоте 6,8 кГц по режиму 2 импульса с энергией 10 кДж. Полученные результаты измерений сведены в таблицу 1.

Данные по остаточным суммарным макронапряжениям II рода после обработки лазером по сравнению с исходными данными до обработки показали, что из растягивающих они стали сжимающими, но не существенно. После МИО величина сжимающих остаточных напряжений возрастает. После обработки лазером твердость поверхности возросла, а после МИО по выбранному режиму твердость снизилась в пределах погрешности измерений, при этом увеличилась пластичность, что увеличивает прочность изделий при ударных нагрузках.

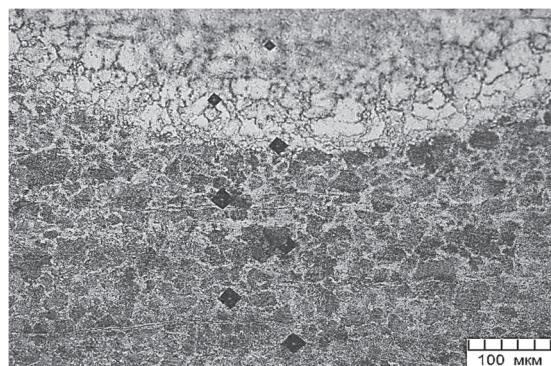
Проведены металлографические исследования образцов из стали 45 после лазерной обработки (рисунок 2, *a, б*) и после комбинированной: лазерная с последующей МИО (рисунок 3). На рисунке 2, *a*, видна исходная структура основы 1, далее идет закаленный слой 2, а за ним следует слой после расплавления 3. Лазерная обработка привела к трансформации и аустенитно-мартенситным превращениям структуры. Отпечатки при измерении твердости показывают, как изменяется твердость закаленного слоя от основы к поверхности.

Таблица 1. — Значения твердости и макронапряжений образца стали 45 при различных видах обработки

Измеряемые свойства	Виды обработки		
	без обработки	лазерная	лазер и МИО
Твердость HRB средняя	85...87	100...122	90...120
Остаточные макронапряжения II рода, ГПа, средние значения	0,4	-0,5	-0,85



a)



б)

Рисунок 2. — Структура контрольного образца из стали 45 после лазерной обработки

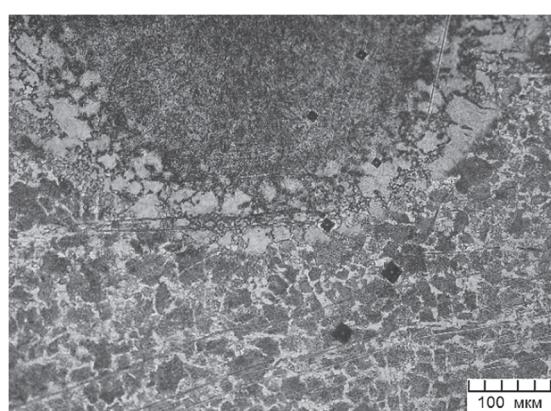


Рисунок 3. — Структура образца из стали 45 после лазерной обработки и МИО

На рисунке 3 представлена структура стали после комбинированной обработки: лазерная обработка и МИО. На фотографии видно, что структура закаленного слоя, более проработанная и равномерная, и твердость ее выше, чем твердость оплавленного слоя.

Металлографические исследования шлифов образцов стали 45 показали, что комбинирование лазерной обработки и МИО приводит к некоторой трансформации структурных элементов поверхностного слоя и изменениям кинетики процесса перлитно-аустенитного превращения, что, в свою очередь, может способствовать улучшению физических и механических свойств стали.

После воздействия лазера произошло изменение свойств поверхности образцов в зависимости от интенсивности лазерного излучения. После МИО по выбранному режиму твердость поверхности несколько снизилась, при этом увеличилась пластичность, что в итоге увеличивает прочность изделия. После обработки лазером остаточные макронапряжения II рода поменяли свой характер и из растягивающих стали сжимающими. После МИО величина сжимающих остаточных напряжений возрастает. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что комбинированная обработка стальных образцов методами лазерной обработки, а затем МИО улучшает эксплуатационные свойства поверхностного слоя изделия (прочность, износостойкость, работоспособность).

На рисунке 4 представлены зависимости микротвердости HV 0,1 в поперечном разрезе образца стали 45 при воздействии лазерного луча, который перемещается по поверхности образца со скоростью 8,3 см / с и последующей МИО. То, что кривые, соответствующие разным режимам обработки, расположены на одном графике, позволяет наглядно определить увеличение твердости в зоне лазерной обработки после МИО на глубину до 400 мкм.

На рисунке 5 представлены графики определения микротвердости HV 0,1 в поперечном разрезе стали 45 при воздействии лазерного луча, который перемещается по поверхности образца со скоростью 4,2 см / с, а также графики, полученные при исследовании твердости после МИО. На графиках видно, что твердость закаленной зоны возрастает после МИО на глубине 200 мкм и сравнивается с твердостью после лазерной обработки при глубине 270 мкм.

На рисунке 6 представлены графики определения твердости HV 0,1 в поперечном разрезе стали 45 при воздействии лазерного луча, который перемещается по поверхности образца со скоростью 1,7 см / с, а также графики, полученные при исследовании твердости после МИО. На графиках видно, что твердость закаленной зоны не изменяется после МИО на всей глубине закаленной зоны от 200 до 400 мкм и равна твердости после лазерной обработки при всей глубине измерений.

Из полученных графиков можно сделать вывод, что при большой скорости перемещения лазерного луча не происходит сильное оплавление металла, в зоне закалки увеличивается микротвердость по сравнению с исходным материалом, а при комбинированном упрочнении (лазер и МИО) микротвердость увеличивается до 70 % по сравнению с лазером, но при этом не появляются растягивающие макронапряжения.

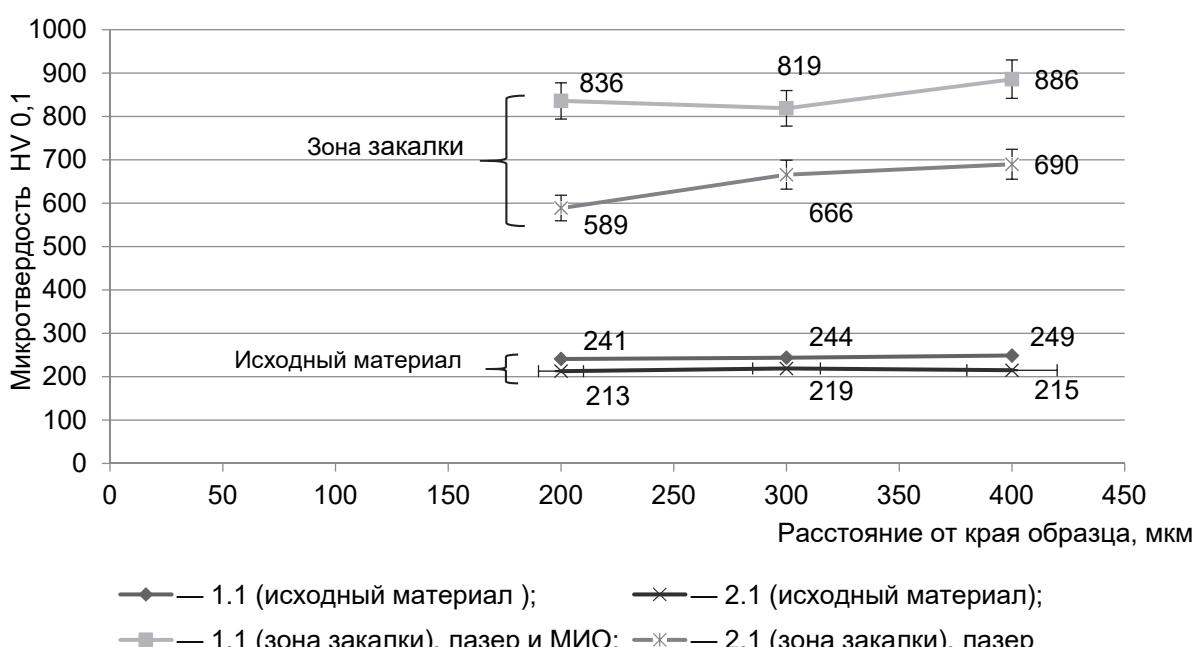


Рисунок 4. — Результаты измерений микротвердости стали 45 после лазерной обработки со скоростью 8,3 см / с и МИО, дорожки на образцах 1.1 (лазер и МИО) и 2.1 (лазер)

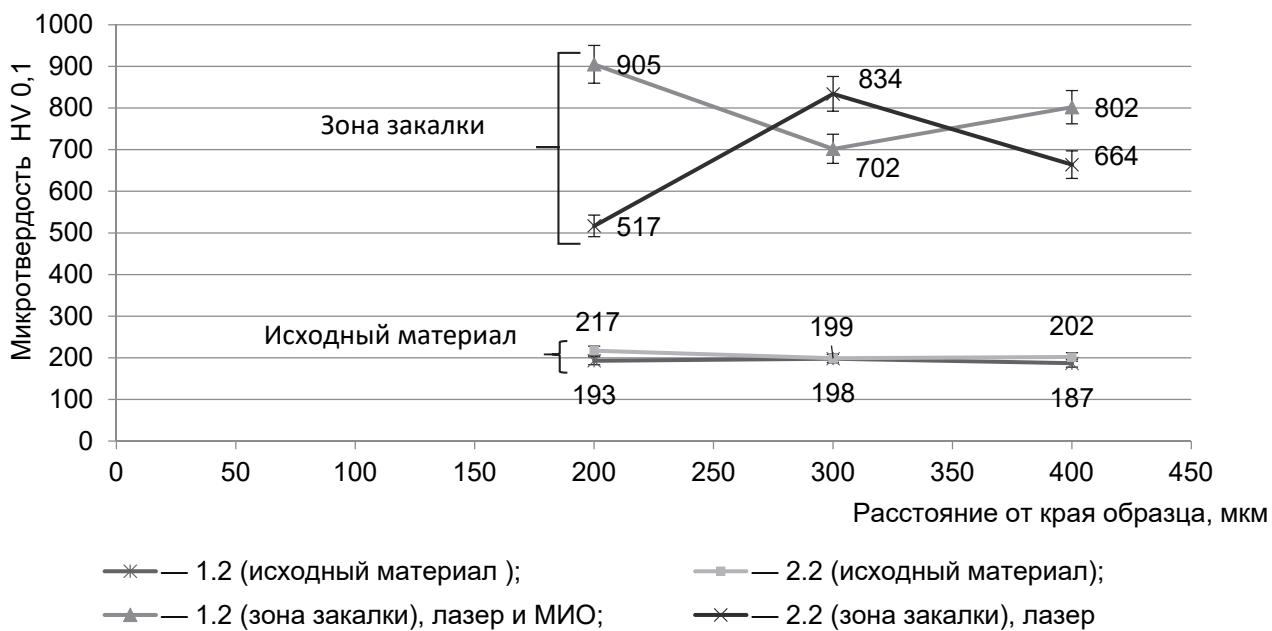


Рисунок 5. — Результаты измерений микротвердости стали 45 после лазерной обработки со скоростью 4,2 см / с и МИО, дорожки 1.2 (лазер и МИО) и 2.2 (лазер)

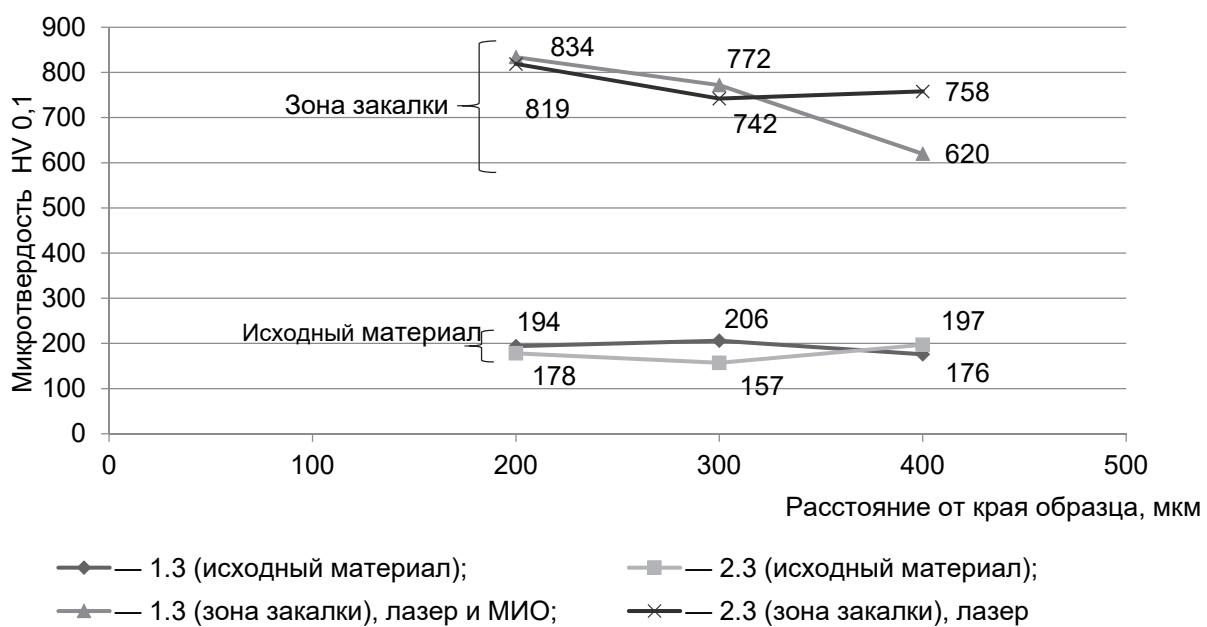


Рисунок 6. — Результаты измерений микротвердости $HV_{0,1}$ стали 45 после лазерной обработки со скоростью 1,7 см / с и МИО, дорожки 1.3 (лазер и МИО) и 2.3 (лазер)

Проведены также исследования твердости и макронапряжений II рода на поверхности образца инструментальной стали X12M после комбинированной обработки. Металлографические и дюраметрические исследования показали, что после лазерной обработки с максимальной скоростью 8,3 см / с не произошла трансформация структуры, твердость поверхности образцов не изменилась.

МИО производилась на МИУ-3 на плоском индукторе по экспериментальному режиму с энергией 7 кДж. После каждой обработки измерялись твердость и остаточные макронапряжения. Полученные средние значения сведены в таблицу 2.

Таблица 2. — Средние значения характеристик стали X12M

Измеряемые свойства материала	Начальные	После лазерной обработки	После лазерной обработки и МИО
Твердость HRB средняя	107	107	106...107
Остаточные макронапряжения II рода, ГПа, средние значения	-0,57	0,49	0,35

После МИО по выбранному режиму твердость поверхности в зоне лазерной дорожки также не изменилась. После обработки лазером у стали X12M макронапряжения изменили знак: из сжимающих стали растягивающими.

В целях определения влияния упрочняющих технологий на свойства стали на машине трения проведены лабораторные сравнительные трибологические испытания образцов инструментальной стали X12M в исходном состоянии и после комбинированной обработки лазером и МИО на воздухе в паре трения. Параметры трибосопряжений в узле трения: неподвижный элемент — плоский стальной образец в паре с подвижным элементом — шарообразным контртелом из стали ШХ15 с нагрузкой 3 Н в течение 3 ч со скоростью 172 мм / с при комнатной температуре. При указанных условиях контртело проделало путь 650 м и получило одинаковый износ в виде площадки. На неподвижных плоских стальных образцах образовались дорожки траекторий изнашивания поверхности.

Результаты испытаний в виде графиков, показанные на рисунке 7, демонстрируют стабилизацию коэффициента трения и повышение его значения до 0,3 на образце после комбинированной обработки в сравнении с 0,2...0,25 на необработанном образце. Приработка образцов после комбинированной обработки произошла в 4 раза быстрее.

Заключение. Проведенные исследования влияния комбинированной обработки лазером и магнитным импульсным полем на механические свойства поверхности сталей 45 и X12M показали, что МИО после лазерной обработки, благодаря электродинамическим силам и возникновению высоких давлений на поверхности образцов, приводит к релаксации суммарных макронапряжений, повышению твердости поверхности. Установлено, что комбинирование лазерной обработки и МИО приводит к некоторой трансформации структурных элементов поверхностного слоя и изменениям кинетики процесса перлитно-аустенитного превращения, что способствует улучшению физических и механических свойств конструкционной и инструментальной сталей.

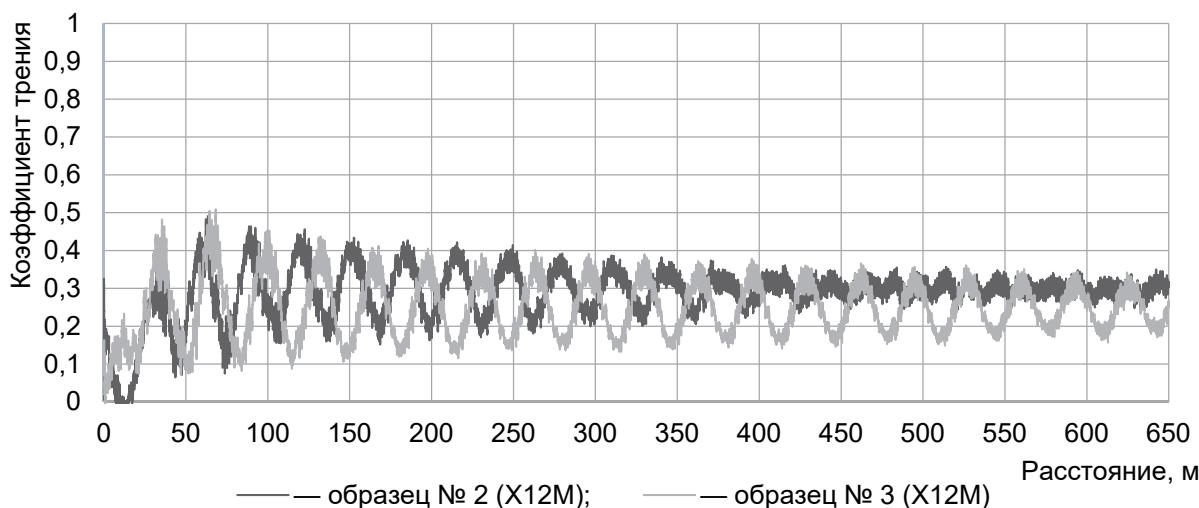


Рисунок 7. — Результаты трибологических сравнительных испытаний образцов стали X12M: № 2 — образец стали после комбинированной обработки; № 3 — исходный образец без обработки

Проведенные лабораторные сравнительные трибологические испытания образцов инструментальной стали X12M показали стабилизацию, повышение коэффициента трения и снижение в 4 раза времени приработки. Применение различных параметров лазерной обработки показало, что точный контроль параметров лазера (мощность, скорость сканирования и перекрытие луча) имеет решающее значение для достижения желаемого результата упрочнения.

Научная значимость результатов заключается в разработке нового метода с оптимальными параметрами режимов комбинации лазерной обработки и МИО на основе выбора скоростных режимов сканирования лучом лазера, а также энергии и длительности МИО.

Полученные результаты позволяют рекомендовать комбинацию лазерной обработки и высокоскоростной МИО конструкционной и инструментальной сталей в целях повышения их эксплуатационных свойств. Целесообразно также продолжить изучение влияния вышеуказанных методов упрочнения на других марках стали.

Список цитируемых источников

1. Астапчик, С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. — Минск : Белорус. наука, 2008. — 252 с.
2. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка материалов / А. В. Алифанов, А. М. Милюкова, А. Н. Матяс [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. — Минск : ФТИ НАН Беларусь, 2021. — Кн. 1 : Новые технологии и материалы / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — С. 127—153.

Поступила в редакцию 08.04.2025.

УДК 621.7.079

А. А. Пивоварчик¹, кандидат технических наук, доцент,**А. К. Гавриленя²**, кандидат технических наук, доцент¹Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», ул. Ожешко, 22, 230021 Гродно, Республика Беларусь, +375 (29) 876 68 24, Pivovarchik_AA@grsu.by²Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 22 259 33, AndrejGavrilena@mail.ru

ВОДОЭМУЛЬСИОННАЯ СМАЗКА ДЛЯ ПЕСЧАНО-СМОЛЯНЫХ СТЕРЖНЕЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ПО НАГРЕВАЕМОЙ ОСНАСТКЕ

В статье представлены результаты исследований по разработке состава водоэмulsionционной смазки, используемой при изготовлении песчано-смоляных стержней по нагреваемой оснастке. Установлено, что условная вязкость разрабатываемых составов смазок снижается с 10 до 8 с при добавлении олеиновой кислоты к полиметилсиликсановой жидкости в количестве от 5 до 25 %, также отмечается снижение плотности смазок с 908 до 882 кг / м³. Показано, что добавление олеиновой кислоты к основе в количестве 15 % приводит к повышению седиментационной устойчивости смазки более чем в 30 раз. Экспериментально установлено, что наилучшими технологическими и потребительскими свойствами обладает разработанный состав смазки при следующем соотношении компонентов: основа (полиметилсиликсановая жидкость ПМС 300) — 15 %, добавка (олеиновая кислота) — 15 %, поверхностно-активное вещество — 3 %, вода — остальное.

Результаты исследований могут быть использованы инженерами-технологами при выборе состава смазки для изготовления стержней по нагреваемой оснастке.

Ключевые слова: водоэмulsionционная смазка; олеиновая кислота; растительное масло; песчано-смоляная смесь; стержень; стержневой ящик; дефект.

Табл. 3. Библиогр.: 14 назв.

А. А. Pivovarchyk¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

А. К. Haurylenia², PhD in Technical Sciences, Associate Professor

¹Institution of Education “Yanka Kupala State University of Grodno”, 22 Ozhesko Str., 230021 Grodno, the Republic of Belarus, +375 (29) 876 68 24, Pivovarchik_AA@grsu.by

²Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy, the Republic of Belarus, +375 (29) 22 259 33, AndrejGavrilena@mail.ru

WATER-BASED EMULSION LUBRICANT FOR SAND-RESIN RODS MANUFACTURED USING HEATED TOOLING

The article presents the findings of research conducted on the development of a water-based emulsion lubricant utilised in the fabrication of sand-resin rods employing heated tooling. The study revealed that the conditional viscosity of the developed lubricant formulations decreased from 10 to 8 seconds when oleic acid was incorporated into polymethylsiloxane liquid in quantities ranging from 5 to 25 per cent. Additionally, a decline in lubricant density was observed, from 908 to 882 kilograms per cubic metre. It has been demonstrated that the incorporation of oleic acid into the base, in a quantity of 15 %, results in an enhancement of the lubricant's sedimentation stability by more than 30 times. Through experimental analysis, it has been determined that the developed lubricant composition optimises both technological and consumer properties when formulated with the specific component ratio of 15 % base (polymethylsiloxane liquid PMS 300), 15 % additive (oleic acid), 3 % surfactant, and the remainder water.

These findings can be utilised by process engineers when selecting the lubricant composition for the manufacture of rods using heated tooling.

Key words: water-based emulsion lubricant; oleic acid; vegetable oil; sand-resin mixture; rod; rod box; defect.
Table 3. Ref.: 14 titles.

Введение. В настоящее время предъявляются достаточно высокие требования к качеству стержней, изготавливаемых из песчано-смоляных смесей. Стержни из песчаных и песчано-глинистых смесей, изготавливаемые автоматизированно и механизированно на встряхивающих, пескометных, пескодувных и пистолетных машинах и автоматах, а также вручную, требуют продолжительной сушки. Изготовление стержней из холоднотвердеющих и жидких самотвердеющих смесей вследствие продолжительного цикла их затвердевания наиболее целесообразно для единичного, мелкосерийного и реже серийного производства средних и крупных по массе стержней. Указанные недостатки отсутствуют при изготовлении стержней из песчано-смоляных смесей по нагреваемой оснастке. Основными преимуществами процесса изготовления стержней по нагреваемой оснастке являются отсутствие сушки стержней в сушилах, высокая прочность получаемых стержней (120...500 МПа), малая их осыпаемость, возможность получения отливок с чистой поверхностью и высокой размерной точностью. Однако стержневые смеси на основе различных термореактивных связующих налипают на рабочую поверхность стержневого ящика, что ухудшает качество поверхности стержней, их размерную точность, увеличивает брак, а в некоторых случаях может быть причиной полного разрушения стержней при их извлечении. Наибольшей налипаемостью на поверхность стержневого ящика обладают стержневые смеси, при изготовлении которых в качестве связующего используются фенолоформальдегидные смолы [1; 2]. В целях уменьшения налипания стержневой смеси на поверхность стержневого ящика неотъемлемой частью технологии получения песчано-смоляных стержней является использование смазки, которая существенно снижает действие сил адгезии между стержнем и стержневым ящиком в процессе его изготовления [1—4]. К смазкам, используемым при изготовлении стержней из песчано-смоляных смесей по нагреваемой оснастке, предъявляются следующие технологические и потребительские требования: термостойкость смазки должна составлять 300 °C, смазка должна наноситься механизированно, при деструкции компонентов смазки не должно наблюдаться значительного дымовыделения, смазка должна обеспечивать многократное извлечение стержней из оснастки после разового нанесения, высокая седиментационная устойчивость [1; 3].

В настоящее время на машиностроительных предприятиях Республики Беларусь при изготовлении головок блоков цилиндров тракторов и автобусов для стержней по нагреваемой оснастке широко используется смазка КЭ-1001 производства ЗГП «Кремнийполимер» (Украина), а также смазка СВ-3 производства ОДО «Эвтектика» (Беларусь). Однако вышеуказанные водоэмulsionционные смазки содержат фунгициды, которые препятствуют разложению органической основы смазки при длительном хранении и при испарении выбрасывают в атмосферу вредные для здоровья человека компоненты [2].

Данная работа направлена на создание импортозамещающей продукции путем разработки отечественного состава водоэмulsionционной смазки, используемой при изготовлении песчано-смоляных стержней по нагреваемой оснастке. Применение разработанного состава водоэмulsionционной смазки позволит уменьшить брак при изготовлении песчано-смоляных стержней.

Целью данной работы является разработка состава водоэмulsionционной смазки для изготовления песчано-смоляных стержней, его исследование и совершенствование.

Материалы и методы исследования. На кафедре материаловедения и ресурсосберегающих технологий (ГрГУ им. Я. Купалы) совместно с кафедрой «Металлургия литейных сплавов» (БНТУ) разработана водоэмulsionционная смазка для изготовления стержней из песчано-смоляных смесей по нагреваемой оснастке. Выбор компонентов состава смазки для изготовления стержней из песчано-смоляных стержней по нагреваемой оснастке осуществляли исходя из требований, предъявляемых к данным смазкам. В качестве основы разработанной смазки был выбран высокомолекулярный кремнийорганический полимер — полиметилсиликсановая жидкость ПМС 300. Известно, что полиметилсиликсановая жидкость ПМС 300 обладает высокой разделяющей способностью, относительно высокой термостойкостью (до 305 °C), низкой газотворностью при температурах до 573 K (15 см³/г), а также является экологически безопасным продуктом [5—10]. Следует отметить, что

полиметилсилоксановая жидкость марки ПМС 300 имеют существенный недостаток — относительно низкую смазывающую способность [4—6]. В работах [7—9] указывается, что для повышения смазывающей способности смазки целесообразно использовать в качестве добавки экологически безопасные вещества растительного и животного происхождения: растительные масла, животные жиры и их производные (жирные кислоты). Данные вещества хорошо смешиваются с полиметилсилоксановыми жидкостями (особенно после их нагрева), образуя густую однородную массу. Исходя из вышесказанного, было принято решение использовать добавку олеиновой кислоты и растительного масла.

В качестве поверхностно-активного вещества (ПАВ), необходимого для получения водоэмульсионной смазки с высокой седimentационной устойчивостью, использовали неионогенное моющее средство. В качестве разбавителя при изготовлении смазки использовалась вода.

Для приготовления составов смазки использовали двухлопастной лабораторный смеситель с частотой вращения лопаток $1\ 250\ \text{мин}^{-1}$. Точное дозирование компонентов смазки перед перемешиванием производилось объемным методом с использованием цилиндра 1-100-1 (ГОСТ 1770-74) вместимостью 100 мл и ценой деления 1,0 мл. Подогрев компонентов смазки проводили с использованием стационарной электрической плитки. Температура подогрева компонентов смазки перед перемешиванием составляла $80\ ^\circ\text{C}$ и контролировалась при помощи термометра А1 (ГОСТ 28498-90) с ценой деления $1\ ^\circ\text{C}$. Время перемешивания исходных компонентов составляло 10 мин. Седimentационная устойчивость смазки оценивалась по времени расслоения приготовленной водной эмульсии. Условная вязкость составов смазки определялась временем истечения жидкости определенного объема из вискозиметра марки ВЗ-4 (ГОСТ 9070-75). Плотность приготовленных составов смазки исследовали с использованием ареометра общего назначения марки АОН-1 700-1840 (ГОСТ 18481-81). Для определения показателя pH разработанных составов смазок применяли pH-метр (pH-150) с погрешностью измерений не более $\pm 0,1$ ед. pH.

Перед нанесением смазки на поверхность стержневого ящика исследуемые водоэмульсионные смазки в зависимости от сложности изготавливаемых стержней разбавляли водой в соотношении от 1:20 до 1:50. Смазку наносили при помощи пистолета-распылителя с расстояния 0,4 м при давлении воздуха в сети 0,3 МПа. Время распыления смазки на поверхность стержневого ящика составляло 3 с. Периодичность нанесения смазки составляла 1 раз в 3 цикла. Рабочую температуру поверхности стержневого ящика в процессе изготовления стержней измеряли с помощью тепловизора модели Sat S-280. Погрешность измерения тепловизора составляла $\pm 2\ ^\circ\text{C}$. Шероховатость поверхности стержневого ящика составляла $0,4\ \text{Ra}$. Время выдержки стержневой смеси до извлечения стержня из полости стержневого ящика контролировалось с помощью реле времени и составляло 45 с. При проведении исследований по определению технологических свойств разработанных смазок визуально контролировалось беспрепятственное извлечение стержней из стержневого ящика, налипание смазки на формообразующую поверхность стержневого ящика, дальнейшее качество покраски стержней.

Результаты исследования и их обсуждение. Составы разработанных водоэмульсионных смазок представлены в таблице 1.

Таблица 1. — Составы разработанных водоэмульсионных смазок

Номер состава	Массовая доля основных компонентов, %				
	Полиметилсилоксановая жидкость марки ПМС 300	Олеиновая кислота	Растительное масло	ПАВ	Вода
1	15	5	—	3,0	Остальное
2	15	10	—	3,0	Остальное
3	15	15	—	3,0	Остальное
4	15	20	—	3,0	Остальное

Окончание таблицы 1

Номер состава	Массовая доля основных компонентов, %				
	Полиметилсилоксановая жидкость марки ПМС 300	Олеиновая кислота	Растительное масло	ПАВ	Вода
5	15	25	—	3,0	Остальное
6	15	—	5	3,0	Остальное
7	15	—	10	3,0	Остальное
8	15	—	15	3,0	Остальное
9	15	—	20	3,0	Остальное
10	15	—	25	3,0	Остальное
11 (КЭ-1001)	—	—	—	—	—
12 (СВ-3)	—	—	—	—	—

В таблице 2 показаны физико-химические и потребительские свойства разработанных составов смазок для изготовления стержней по нагреваемой оснастке.

Рабочая температура поверхности стержневого ящика после извлечения стержней составляла 200...205 °C. Показано, что условная вязкость разработанных составов смазок 1...5 снижается с 10 до 8 с при добавлении к основе олеиновой кислоты в количестве от 5 до 25 % (см. таблицу 2). Экспериментально установлено, что при добавлении олеиновой кислоты к основе смазки наблюдается снижение плотности составов смазок 1...5 с 908 до 882 кг / м³. Полученное изменение вязкости и плотности исследуемых составов смазок обусловлено изменением сопротивления жидкости сдвигу вследствие проникновения между молекулами полиметилсилоксановой жидкости ПМС 300 молекул веществ, входящих в состав добавки, что приводит к разрыхлению основы смазки [7; 8]. Следует отметить, что с увеличением количества олеиновой кислоты в смазке наблюдается повышение уровня pH с 7,7 до 8,3 ед. pH. Также наблюдается существенный рост седиментационной устойчивости состава смазки 3 (более 9 мес.) при добавке свыше 15 % олеиновой кислоты к основе смазки, что соответствует седиментационной устойчивости исследуемых аналогов (составы 11 и 12). Однако дальнейшее увеличение количества олеиновой кислоты (более 25 %) и ПАВ (до 5 %) не приводит к росту седиментационной устойчивости приготовляемой эмульсии.

Т а б л и ц а 2. — Физико-химические и потребительские свойства разработанных составов смазок для изготовления стержней по нагреваемой оснастке

Номер состава	Свойства составов			
	Условная вязкость по ВЗ-4 при 20 °C, с	Плотность, кг / м ³	pH	Седиментационная устойчивость смазки, мес.
1	10	908	7,7	0,3
2	10	906	7,9	0,6
3	9	886	8,0	> 9
4	8	884	8,1	> 9
5	8	882	8,3	> 9
6	10	915	7,1	0,1
7	11	918	7,1	0,3
8	11,5	924	7,2	0,6
9	11,5	929	7,2	0,6
10	12	938	7,2	0,6
11 (КЭ-1001)	9	905	7,2	> 9
12 (СВ-3)	10	910	7,0	> 9

Экспериментально установлено, что условная вязкость разработанных составов смазок 6...10 возрастает с 10 до 12 с при добавлении к основе растительного масла в количестве от 5 до 25 %. При этом плотность смазки увеличивается от 915 до 938 кг / м³, а значение pH находится в диапазоне от 7,1 до 7,2 ед. pH. Следует отметить, что добавка растительного масла не способствует значительному разрыхлению основы смазки. Кроме того, седиментационная устойчивость составов смазки 6...10 составляет не более 0,6 мес. и в 15 раз уступает по данному показателю исследуемым аналогам (составы 11 и 12).

В таблице 3 показаны результаты исследования технологических свойств разработанных составов смазок, используемых при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке.

Таблица 3. — Технологические свойства разработанных составов смазок, используемых при изготовлении стержней по нагреваемой оснастке

Номер состава	Виды дефектов изготавливаемых стержней при использовании составов смазок			
	Отсутствие на поверхности стержней сколов, трещин	Налипание смазки на формообразующую поверхность стержневого ящика	Налипание стержневой смеси на формообразующую поверхность стержневого ящика	Качество покраски стержней
1	—	+	—	+
2	+/-	+	—	+
3	+	+	+	+
4	+	+/-	+	—
5	+	+/-	+	—
6	+/-	+	—	+
7	+/-	+	—	+
8	+	+	+	+/-
9	+	+/-	+	—
10	+	—	+	—
11 (КЭ-1001)	+/-	+	+/-	+/-
12 (СВ-3)	+/-	+	+	+/-

Примечание — + — отсутствие контролируемого дефекта; — контролируемый дефект присутствует; +/- — контролируемый дефект периодически возникает.

При использовании составов смазок 1 и 2 после удаления стержней из стержневого ящика из-за налипания стержневой смеси на формообразующую поверхность стержневого ящика наблюдаются сколы и трещины в стержнях (см. таблицу 3). Это обусловлено тем, что составы смазок 1 и 2 обладают низкой смазывающей способностью ввиду незначительного количества добавки олеиновой кислоты (5 и 10 % соответственно). Данные составы имеют сравнительно невысокую адгезионную способность к поверхности стержневого ящика и, как следствие, низкую эрозионную устойчивость смазочного слоя при вдувании стержневой смеси в формообразующую полость стержневого ящика [10—13]. Нужно отметить отсутствие контролируемых видов дефектов, возникающих при изготовлении стержней из песчано-смоляных смесей по нагреваемой оснастке, при использовании состава смазки 3 (ПМС 300 — 15 %, олеиновая кислота — 15 %, ПАВ — 3,0 %, вода — остальное). Полученный результат объясняется тем, что олеиновая кислота относится к группе жирных кислот, которые обладают высокими смазывающими свойствами [6—9]. Результаты исследований показывают, что увеличение количества добавки олеиновой кислоты (более 15 %) к основе смазки способствует появлению дефекта стержней по качеству покраски: часть поверхности стержня не окрашивается. Это происходит вследствие накопления смазки на формообразующей поверхности стержневого ящика из-за высокой адгезионной и эрозионной способности смазки, обусловленной повышенным содержанием олеиновой кислоты.

При использовании в качестве добавки растительного масла в составах смазок 6 и 7 на поверхности стержней после их удаления из стержневого ящика наблюдаются сколы и трещины, налипание стержневой смеси на формообразующую поверхность стержневого ящика (см. таблицу 3). Очевидно, что наличие данного вида дефекта обусловлено невысокой смазывающей способностью смазки и низкой адгезионной стойкостью смазочного слоя, образующегося на поверхности стержневого ящика. При использовании в качестве добавки растительного масла лучшие технологические свойства наблюдаются у состава смазки 8, но при его использовании имеет место дефект, выраженный в снижении качества покраски. Следует отметить, что при содержании 12,0...13,5 % растительного масла в составе смазки 8 дефект по качеству покраски не наблюдается. Исследование составов смазки 9 и 10 показали, что при изготовлении стержней имеют место дефекты, выраженные в налипании смазки на формообразующую поверхность стержневого ящика, а также дефекты по качеству покраски стержней. Полученный результат объясняется наличием в растительном масле предельных и непредельных жирных кислот (стеариновая и олеиновая кислоты) и их производных, обладающих высокой смазывающей и эрозионной способностью, что способствует накоплению смазки на поверхности стержневого ящика и стержня [10—14].

При проведении экспериментов с использованием составов смазок 11 и 12 отмечается наличие на поверхности стержней сколов, трещин, налипание стержневой смеси на формообразующую поверхность стержневого ящика, а также снижение качества покраски изготавливаемых стержней из песчано-смоляных смесей по нагреваемой оснастке.

Заключение. Проведенные исследования позволили установить, что при изготовлении стержней из песчано-смоляных стержней по нагреваемой оснастке в качестве водоэмulsionционной смазки целесообразно использовать состав на основе полиметилсиликсановой жидкости ПМС 300 с добавкой олеиновой кислоты. При этом оптимальное количество олеиновой кислоты в составе смазки составляет 15 %. Разработанный состав водоэмulsionционной смазки обладает высокими технологическими свойствами и не уступает по потребительским свойствам исследуемым аналогам.

Список цитируемых источников

1. Кукуй, Д. М. Теория и технология литейного производства / Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов, В. Н. Эктова. — Минск : Дизайн ПРО, 2010. — 416 с.
2. Михальцов, А. М. Водоэмulsionционные смазки для пресс-форм литья под давлением / А. М. Михальцов, В. А. Розум, А. А. Пивоварчик // Литье и металлургия. — 2005. — № 4. — С. 104—105.
3. Михальцов, А. М. Водоэмulsionционные разделительные покрытия для изготовления стержней по нагреваемой оснастке / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик, А. Г. Курьян // Литье и металлургия. — 2007. — № 2. — С. 178—179.
4. Михальцов, А. М. Исследование экологической безопасности смазок для литья под давлением алюминиевых сплавов / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик, А. С. Панасюгин // Литье и металлургия. — 2008. — № 1. — С. 133—135.
5. Михальцов, А. М. Газотврность разделительных покрытий для пресс-форм литья алюминиевых сплавов под давлением / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик, А. А. Суббота // Литье и металлургия. — 2010. — № 4. — С. 85—89.
6. Михальцов, А. М. Разработка водоэмulsionционных смазок для пресс-форм литья под давлением / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик, В. А. Розум // Литейное производство. — 2006. — № 3. — С. 15—16.
7. Михальцов, А. М. Разработка комплексного компонента на основе кремнийорганических полимеров для пресс-форм литья под давлением / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик, Л. М. Слепнева // Литье и металлургия. — 2008. — № 1. — С. 129—133.
8. Пивоварчик, А. А. Разработка разделительных покрытий на основе кремнийорганических материалов для пресс-форм литья под давлением / А. А. Пивоварчик, Л. М. Слепнева, В. А. Розум // Литейщик России. — 2007. — № 1. — С. 36—40.
9. Михальцов, А. М. Материалы разделительных покрытий пресс-форм литья алюминиевых сплавов под давлением / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик, С. К. Дятловский // Литейщик России. — 2012. — № 7. — С. 38—40.

10. *Пивоварчик, А. А.* Формирование слоя разделительного покрытия на поверхности пресс-формы при литье под давлением / А. А. Пивоварчик, А. М. Михальцов // Литье и металлургия. — 2015. — № 1. — С. 62—65.
11. *Михальцов, А. М.* Исследование адгезионной способности смазок на основе кремнийорганических полимеров для литья под давлением алюминиевых сплавов / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик // Литье и металлургия. — 2007. — № 1. — С. 131—134.
12. *Михальцов, А. М.* Эрозионная стойкость смазок при изготовлении отливок из алюминиевых сплавов методом литья под давлением / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик // Литье и металлургия. — 2008. — № 2. — С. 47—51.
13. *Михальцов, А. М.* Исследование адгезионной способности смазок на основе кремнийорганических полимеров для литья под давлением алюминиевых сплавов / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик // Литейщик России. — 2007. — № 7. — С. 11—13.
14. *Михальцов, А. М.* Накопление разделительных покрытий на рабочей поверхности технологической оснастки при литье под давлением алюминиевых сплавов / А. М. Михальцов, А. А. Пивоварчик // Металлургия. — 2007. — № 31. — С. 179—189.

Поступила в редакцию 08.04.2025.

УДК 621.762

А. И. Филиппов¹, С. Д. Лещик², Ю. К. Калугин³, И. В. Дубень⁴¹Учреждение образования «Гродненский государственный аграрный университет», ул. Терешковой, 28, 230008 Гродно, Республика Беларусь, +375 (29) 396 29 66, a.fil07@mail.ru^{2, 3}Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», ул. Ожешко, 22, 230023 Гродно, Республика Беларусь, 8 (0152) 48 27 94, ²s.lesh@grsu.by, ³kalugin_jk@grsu.by⁴Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225401 Барановичи, Республики Беларусь, +375 (163) 64 06 73, duben_i_v@mail.ru

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ИЗНОС ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНТАКТИРУЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Рассмотрены особенности лазерной обработки материалов, которая представляет собой передовую технологию и позволяет значительно увеличить износостойкость деталей за счет изменения их микроструктуры, физико-химических свойств и топографии. Проведен анализ основных факторов, влияющих на снижение интенсивности поверхностного износа контактирующих деталей автомобильного транспорта, прошедших упрочняющую обработку лазерным методом. Исследованы особенности структурных изменений в поверхностном слое и их влияние на повышение износостойкости деталей, а также влияние различных факторов, таких как проработка, удельная нагрузка, скорость скольжения, на интенсивность изнашивания. В статье приведены результаты экспериментальных исследований и зависимости, полученные при испытаниях образцов из стали 40Х.

Ключевые слова: износостойкость; поверхностный износ; изнашивание деталей; упрочнение; лазерная обработка.

Рис. 4. Библиогр.: 5 назв.

A. I. Filippov¹, S. D. Leshchik², Yu. K. Kalugin³, I. V. Duben⁴¹Institution of Education “Grodno State Agrarian University”, 28 Tereshkova Str., 230008 Grodno, the Republic of Belarus, +375 (29) 396 29 66, a.fil07@mail.ru^{2, 3}Institution of Education “Yanka Kupala State University of Grodno”, 22 Ozheshko Str., 230023 Grodno, the Republic of Belarus, 8 (0152) 48 27 94, ²s.lesh@grsu.by, ³kalugin_jk@grsu.by⁴Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225401 Baranavichy, the Republic of Belarus, +375 (163) 64 06 73, duben_i_v@mail.ru

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF LASER HARDENING FACTORS ON THE SURFACE WEAR OF CONTACTING PARTS OF MOTOR VEHICLES

The features of laser processing of materials are considered in this study. This advanced technology has been shown to significantly increase the wear resistance of the surface by altering its microstructure, physicochemical properties and topography. The analysis of the main factors influencing the reduction of the intensity of surface wear of contacting parts of motor vehicles that have undergone laser hardening treatment has been carried out. The study investigates the structural alterations in the surface layer and their impact on enhancing the wear resistance of components. Various factors, including run-in, specific load, and sliding speed, have been examined to understand their influence on the intensity of wear. The article presents the results of experimental studies and dependencies obtained during testing of 40X steel samples.

Key words: wear resistance; surface wear; wear of parts; hardening; laser processing.

Fig. 4. Ref.: 5 titles.

Введение. Сроки службы большинства сельскохозяйственных машин составляют 8...10 лет, что обусловлено главным образом изнашиванием деталей и коррозионными процессами. К примеру, ежегодные затраты на ремонт и обслуживание трактора составляют 20...30 % от его общей стоимости. Применение деталей, прошедших упрочняющую обработку, позволит не только сократить потребность в запасных частях, но и сэкономить значительные материальные средства.

На трибологические характеристики деталей из стали значительное влияние оказывает структура их поверхностных слоев. Именно с внешних слоев, которые подвергаются механическим воздействиям, коррозии и высокой температуре, начинается разрушение изделий автомобильной и машиностроительной промышленности. В результате потеря работоспособности оборудования происходит в первую очередь из-за поверхностного износа деталей. Типичным для автотракторной техники является нарушение зазоров между подшипниками и шейками коленвала двигателя, зубьями конических передач, а также отклонения осевых зазоров у конических подшипников, радиальных зазоров — у шариковых и роликовых подшипников.

Увеличение зазоров в гладких соединениях (например, элементах шатунно-поршневой группы, плунжерных парах, пальцах и проушинах звеньев гусениц) ведет к снижению эффективной мощности двигателя, перерасходу топлива и уменьшению коэффициента полезного действия трактора или автомобиля. Ослабление креплений соединений вызывает излишнюю вибрацию и динамические нагрузки на детали механизмов. Следствием таких процессов является нарушение соосности некоторых агрегатов. К примеру, если нарушаются соосность между коленвалом двигателя трактора и первичным валом коробки передач или валом заднего моста с ведущими шестернями, это приводит к избыточному нагреву деталей и их ускоренному износу.

Таким образом, к основным факторам, влияющим на износ деталей техники, относятся температура окружающей среды, качество топлива и смазочных материалов, состав грунта под колесами машины или тракторных гусениц, равномерность нагрузки во время работы, своевременность технического обслуживания и др.

С развитием упрочняющих технологий и методов модификации структуры поверхностных слоев материалов на микро- и наноуровне роль состояния поверхности деталей в общей технологической системе значительно увеличивается. Одним из современных методов улучшения эксплуатационных свойств деталей является воздействие на поверхность металла лазерного луча [1; 2]. Происходящие изменения в структуре металла, как правило, приводят к улучшению прочностных свойств. Ряд исследований в области упрочняющего воздействия показывает различную динамику износа и подверженность факторам, ускоряющим этот негативный процесс. Цель данных исследований — установление наиболее значимых факторов, ускоряющих износ обработанных деталей автотранспортных средств, а также разработка режимов лазерной обработки, способствующих повышению долговечности и надежности ответственных деталей и узлов.

Материалы и методы исследования. Для проведения экспериментов выбрана конструкционная сталь 40Х, широко применяемая для изготовления ответственных деталей сельскохозяйственных автотранспортных средств. Структура поверхностного слоя, которая формируется в конструкционных легированных сталях вследствие лазерного воздействия, определяется полнотой протекания аустенитного превращения при нагревании, что, в свою очередь, зависит от таких факторов, как скорость и температура нагревания, а также время взаимодействия с первоначальной структурой материала.

При проведении исследования производилось воздействие лазерным лучом без оплавления поверхности. Эффект упрочнения в большинстве случаев такой обработки достигался за счет частичной или полной модификации структуры [3]. Лазерная модификация поверхности обычно происходит посредством ряда процессов, в числе которых изменение фазового состава, создание аморфных структур или формирование упрочняющих покрытий.

Ключевые механизмы улучшения износстойкости включают также повышение твердости за счет быстрого охлаждения расплавленного слоя (лазерное закаливание). Начальный этап этого процесса начинается при достижении точки A_{c1} на металлографической диаграмме при температуре 727°C [3]. Эта критическая точка характеризует превращение перлита в аустенит (начало перекристаллизации). Достижение этого этапа упрочнения можно охарактеризовать как полную закалку материала, так и её частичное присутствие. В результате возникает слой с высоким уровнем неоднородности по глубине. При

этом ближе к поверхности формируются мартенсит и оставшийся аустенит после охлаждения из зоны однородного аустенита, а на большей глубине — зона неоднородного аустенита.

При лазерной обработке уже закалённой или отожжённой стали в соответствующих слоях наблюдается уменьшение микротвердости из-за формирования тростита, что характеризует этап отпуска. Второстепенный и последующий слои составляют зону теплового воздействия. Исследование поверхностного слоя упрочненного образца из стали 40Х при скорости луча 45 мм / с и мощности излучения 800 Вт показало, что в зоне воздействия материал получает однородную структуру с мелкозернистым мартенситом.

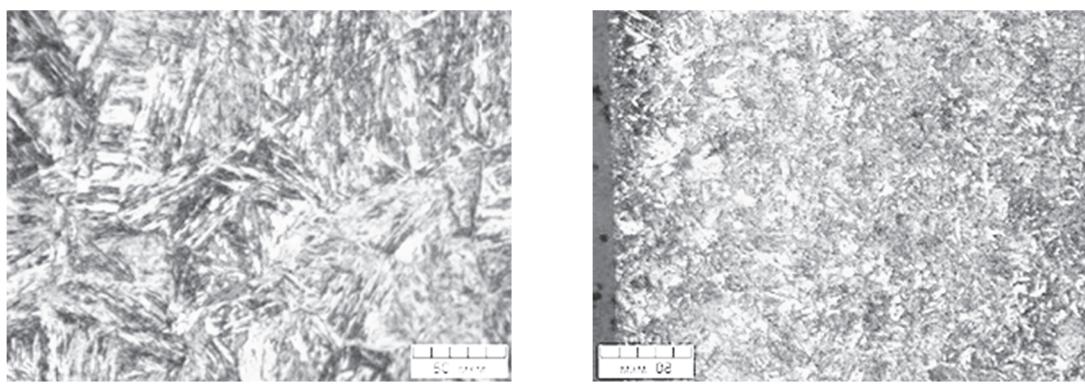
Для изучения микроструктуры нами использован металлографический комплекс на основе микроскопа Микро-Vert (Планар). Анализ структурных изменений осуществлялся с помощью программного обеспечения Image-SP. Оценка структурных изменений до и после интегрированного воздействия проводилась методом точной металлографии с увеличением в 500 и 1 000 раз на нескольких участках по периферии образца.

Результаты исследования и их обсуждение. В результате исследования были выявлены структурные изменения, которые определяют улучшение эксплуатационных характеристик материала. Исходная структура материала детали и ее изменения после воздействия лазерного луча представлены на снимке (рисунок 1).

Результаты воздействия продемонстрировали значительные изменения в структуре стали после лазерной модификации. Было выявлено интенсивное уменьшение размеров зёрен и формирование тонкораспределённой и однородной мартенситной структуры по краям. При этом сохраняется характерная игольчатость мартенсита, хотя она и менее выражена. Зернистость становится менее заметной по сравнению с исходным состоянием. Структура после такой обработки напоминает состояние стали после закалки и последующего отпуска. Кроме того, данные рентгенофазового анализа свидетельствуют о формировании карбидов железа Fe₃C в структуре материала, что указывает на увеличение прочности поверхностного слоя.

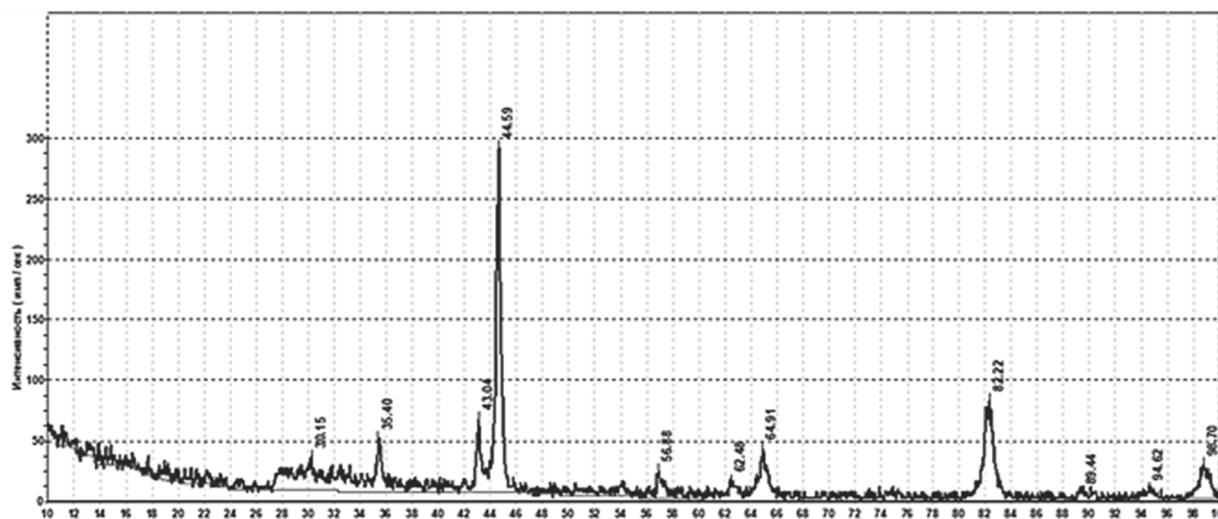
Представим результат дифракционного анализа после проведения лазерной обработки (рисунок 2).

Анализ структуры образцов после воздействия лазерного луча с помощью металлографии выявил значительные изменения в структуре металла. В зонах, подвергшихся обработке, наблюдается значительное уменьшение размера зёрен. Структура становится мелкодисперсной и равномерно распределённой по кромке. Игольчатость мартенсита на снимках после увеличения присутствует, но она менее выражена. Зёрна стали менее заметными по сравнению с исходным образцом.



а — поверхность образца (до упрочнения);
б — изменения структуры после модификации лазерным излучением

Рисунок 1. — Сравнение структурных изменений в поверхностном слое



**Рисунок 2. — Характеристическая дифрактограмма металла
после воздействия лазерного излучения**

Металлографический анализ проб поверхности деталей, подвергнутых лазерному воздействию, демонстрирует значительные трансформации в структуре металла. В частности, отмечается интенсивное уменьшение размеров зерен в областях, подвергшихся обработке. В этих зонах фиксируется формирование тонкодисперсной структуры мартенсита с равномерным распределением по периферии. При этом характерная игольчатая текстура мартенсита все еще прослеживается, хотя и становится менее выразительной.

Контроль состояния структуры в ходе лазерной термической обработки представляет собой ключевой аспект, так как различные стали и сплавы могут демонстрировать противоположные характеристики после одинаковых тепловых процедур: либо упрочнение, либо ослабление их свойств. Отличия проявляются в размерах и характере остаточных напряжений и деформаций. Изменение структуры материалов, как правило, приводит к повышению износостойкости, но на конечный результат влияют различные факторы.

Для определения интенсивности износа при воздействии различных факторов использовался весовой метод. При исследовании трибологических свойств образцов для усредненной оценки интенсивности изнашивания применялась машина трения СМЦ-2 [2; 3] и высокоточные лабораторные весы ОКБ Веста ВМ213-М-І. Измерение величины линейного износа на основе потери массы выполнялось при помощи расчетов, которые исходят из допущения о том, что процесс изнашивания протекает однородно по всей поверхности соприкосновения. Линейный показатель износа отображается как высота слоя, подверженного износу, отнесенная к единичной длине пути трения. В частности, на основе результатов экспериментальных исследований установлено, что высота микронеровностей и поверхностная твердость в значительной степени влияют на интенсивность износа поверхностного слоя контрольного образца (рисунок 3).

Как видно из диаграммы, повышение уровня шероховатости поверхности выше оптимального приводит к усилению износа из-за увеличения механической адгезии, откалывания и обрыва микроскопических неровностей. С другой стороны, снижение шероховатости ниже оптимального также вызывает более интенсивный износ за счет молекулярного склеивания и заедания взаимодействующих поверхностей [4; 5]. Из диаграммы следует, что оптимальные значения шероховатости обработанных материалов, определяющие минимальный износ, лежат в пределах 0,2...0,3 мкм. Такой тип изнашивания типичен для компонентов гидравлических систем и двигателей внутреннего сгорания автомобилей. Результаты экспериментальных исследований показывают значительное увеличение срока службы деталей после лазерного закаливания — в большинстве случаев до 2...3 раз по сравнению с традиционными методами обработки.

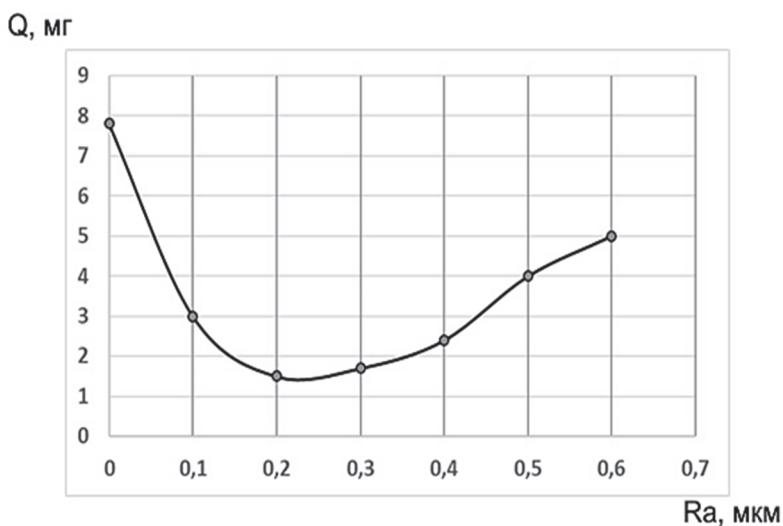


Рисунок 3. — Влияние шероховатости поверхности на износ материала

Процесс разрушения верхнего слоя изделия вызван абразивными частицами, которые, проникая в поверхностный слой и смещаясь по отношению к нему, вызывают пластическую деформацию, упругое вытеснение, резание и царапание металла. Степень изнашивания поверхности определяется твердостью металла и абразивных частиц, размером приложенной нагрузки и скоростью смещения. Для всех видов углеродистой и легированной структурной стали после процессов закалывания и отпуска относительное сопротивление изнашиванию ε возрастает пропорционально увеличению твердости материала детали. Для выбранной марки стали зависимость относительных показателей износа и твердости материала имеет следующий вид (рисунок 4).

Связь между твердостью и износостойкостью в значительной степени обусловлена тем, что более твердые материалы менее подвержены деформациям при контакте с другими телами. Это снижает вероятность возникновения микроскопических повреждений, являющихся основными очагами развития процессов износа. При прогнозировании сроков безотказной эксплуатации оборудования и компонентов, прошедших восстановление или промежуточное упрочнение с использованием высокоэнергетического лазерного излучения, необходимо учитывать ряд факторов.

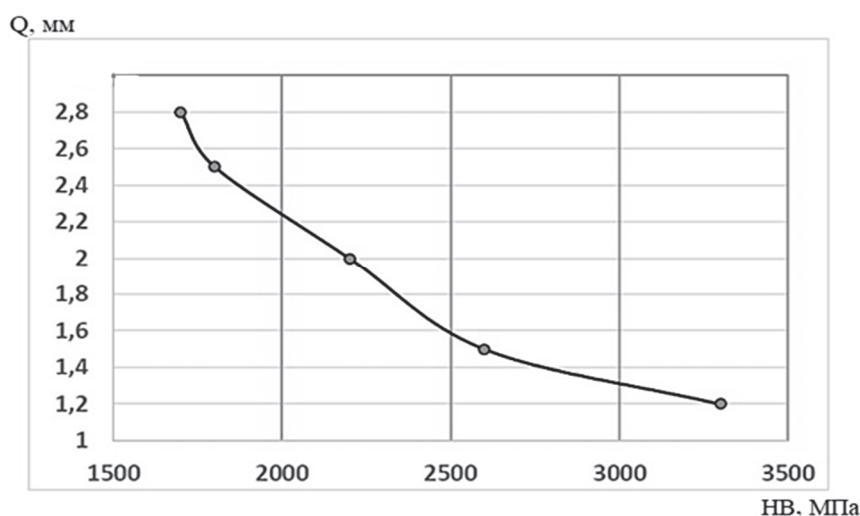


Рисунок 4. — Влияние поверхностной твердости металла на износ

Заключение. Одним из эффективных методов повышения долговечности материалов является контроль твердости поверхностного слоя, что способствует увеличению их сопротивления механическим нагрузкам. Дальнейшие исследования этих процессов будут направлены на разработку новых технологий обработки материалов и изучение наноструктурированных покрытий в целях достижения оптимального баланса между твердостью и вязкостью. Это позволит создавать более надежные конструкции, способные выдерживать сложные эксплуатационные условия. Результаты экспериментальных исследований трибологических свойств образцов с помощью машины трения показывают значительное увеличение срока службы деталей после лазерного закаливания с оптимальным значением шероховатости обработанных материалов 0,2...0,3 мкм, определяющие уменьшение износа, до 2...3 раз по сравнению с традиционными методами обработки. Оптимальные значения поверхностной твердости при испытаниях контрольных деталей составили 2 750...3 345 МПа.

Исследования процессов износа деталей, обработанных лазерно-термическим методом, могут послужить основой для разработки новых технологий на основе матричных и сканирующих систем, обеспечивающих высокую точность контроля процесса, создания инновационных композитных материалов для наплавки, а также оптимизации параметров лазерного излучения для глубокого проникновения энергии в материал без перегрева. Использование лазера в качестве инструмента модификации поверхности открывает широкие перспективы для увеличения срока службы машинных деталей. Это имеет существенное экономическое значение, поскольку позволяет снизить затраты на ремонт и замену оборудования, а также способствует экологической оптимизации за счет уменьшения объема отходов.

Список цитируемых источников

1. Францевич, И. Н. Анодные оксидные покрытия на металлах и анодная защита / И. Н. Францевич ; под общ. ред. И. Н. Францевича. — Киев : Наук. думка, 1985. — 280 с.
2. Фролов, Е. Н. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя и износостойкости деталей машин и оснастки комбинированной обработкой на основе лазерного и электромеханического упрочнения : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Фролов Евгений Николаевич ; Брян. ин-т транспорт. машиностроения. — Брянск, 1991. — 128 л.
3. Суслов, А. Г. Экономичная система технологического обеспечения долговечности поверхностей трения изделий / А. Г. Суслов, И. В. Говоров, А. Н. Щербаков // Тяжелое машиностроение. — 2004. — № 5. — С. 16—18.
4. Харченков, В. С. Технологическое обеспечение износостойкости деталей машин нанесением многослойных покрытий : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / В. С. Харченков ; Брян. ин-т транспорт. машиностроения. — Брянск, 1989. — 326 л.
5. Хромов, В. Н. Упрочнение и восстановление деталей машин термоупругопластическим деформированием / В. Н. Хромов, И. К. Сенченков. — Орел : Изд-во ОГСХА, 1999. — 221 с.

Поступила в редакцию 08.04.2025.

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

УДК 631.8

**М. В. Башаримов¹,
А. Н. Жигалов², доктор технических наук, доцент,
А. Н. Жариков³**

Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларусь», ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030 Могилев, Республика Беларусь,

¹basharimovfilm@gmail.com , ²jigalov6@mail.ru , ³artyomzhanzhora@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МЕТОДА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СЕМЕНА КУКУРУЗЫ СОРТА АМЕРИКАНСКАЯ ЛИГА 98 (КИТАЙСКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА) В УСЛОВИЯХ ГОСУДАРСТВЕННОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ИНСТИТУТ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛОВ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

В статье приведены результаты исследований влияния метода аэродинамического звукового воздействия, основанного на воздействии перед посевной на семена энергией от резонансных волн звуковой частоты посредством промышленной установки, принцип работы которой основан на возбуждении волн звуковой частоты при прохождении воздушного потока через сопла установки, на повышение урожайности семян кукурузы сорта Американская лига 98 (Китайская Народная Республика). Установлено, что применение метода аэродинамического звукового воздействия при предпосевной обработке семян позволило повысить урожайность кукурузы сорта Американская лига 98 при уборке на зерно на 137,7 %, при уборке на силюс — на 124,3 %. Для кукурузы сорта Американская лига 98 рекомендован режим № 3 работы установки аэродинамического звукового воздействия. Метод аэродинамического звукового воздействия не только способствует увеличению урожайности кукурузы, но и помогает минимизировать негативное воздействие на окружающую среду за счет уменьшения доли использования химических удобрений. В условиях, когда экология и устойчивое развитие становятся важнейшими приоритетами в сельском хозяйстве, использование современных технологий, таких как метод аэродинамического звукового воздействия, может открыть новые возможности для агросектора.

Ключевые слова: кукуруза; метод аэродинамического звукового воздействия; урожайность; биологизация; удобрения.

Рис. 7. Табл. 5. Библиогр.: 4 назв.

**M. V. Basharimov¹,
A. N. Zhigalov², DSc in Technical Sciences, Associate Professor,
A. N. Zharikov³**

State Scientific Institution “Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus”,

11 Byalynitskogo-Biruli Str., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus,

¹basharimovfilm@gmail.com , ²jigalov6@mail.ru , ³artyomzhanzhora@gmail.com

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AERODYNAMIC SOUND TREATMENT METHOD ON CORN SEEDS OF THE AMERICAN LEAGUE 98 VARIETY (CHINA) IN THE CONDITIONS OF STATE SCIENTIFIC INSTITUTION “INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF METALS OF NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS”

The article presents the findings of studies conducted on the impact of the aerodynamic sound impact method. This method involves the utilisation of resonant sound waves of a specific frequency to impact seeds prior to sowing. The study utilised an industrial installation that functions by generating sound frequency waves when airflow passes through nozzles. The primary objective of this study was to enhance the yield of corn seeds of the American League 98 variety (China). The findings of the study demonstrated that the implementation of the aerodynamic sound impact method in the pre-sowing

seed treatment process resulted in a substantial enhancement in the yield of corn seeds of the American League 98 variety. This augmentation was observed to be particularly pronounced in the context of grain harvesting, with an increase of 137.7 %, as well as in the context of silage harvesting, where an increase of 124.3 % was recorded. It is recommended that mode No. 3 of the aerodynamic sound impact method unit operation be employed for the corn variety American League 98. The aerodynamic sound impact method has been demonstrated to enhance corn yields while concurrently reducing the environmental impact by diminishing the reliance on chemical fertilisers. In an era where environmental sustainability and ecological integrity are paramount priorities within the agricultural sector, the adoption of contemporary technologies such as the aerodynamic sound impact method has the potential to generate novel opportunities for the agricultural industry.

Key words: corn; aerodynamic sound impact method (ADU); yield; biologization; fertilizers.

Fig. 7. Table 5. Ref.: 4 titles.

Введение. Кукуруза является одной из ключевых сельскохозяйственных культур в Беларуси, играя важную роль в продовольственной безопасности, кормопроизводстве и секторе переработки. Однако, несмотря на высокий потенциал этой культуры, её урожайность нередко ограничивается факторами, такими как болезни растений и низкоэффективные химические удобрения. В результате возникает необходимость поиска инновационных методов и технологий, способствующих увеличению эффективности использования выделенных под посев этой культуре пахотных земель, а также замещение химических удобрений на биологизированные методы повышения урожайности.

Одним из перспективных подходов, не требующих больших затрат, технически сложного оборудования и внесения химических удобрений, является применение метода аэродинамического звукового воздействия (далее — АДУ). Эффект при АДУ достигается за счет воздействия энергии от резонансных волн звуковой частоты на семена перед посевной. В основу работы установки, реализующей метод АДУ, положен принцип возбуждения волн звуковой частоты при прохождении воздушного потока через сопла установки. Установка проста в изготовлении и в эксплуатации, работает от любой промышленной системы приготовления воздуха. Установление необходимых частот, зависящих от структуры и свойств обрабатываемого материала, происходит варьированием объема потребляемого воздуха и размерами выпускного отверстия [1].

Воздействие резонансных волн акустического спектра частот на семена способствует разрушению поверхностных веществ, препятствующих всхожести семян, уничтожает возбудителей болезней и вредителей, повышает активность ферментов, изменяет структуру молекул и аминокислот, ускоряет процессы окисления. В тканях активируются обменные процессы, увеличивается содержание нуклеиновых кислот, стимулируются процессы тканевого дыхания, усиливаются окислительно-восстановительные реакции. Обработка семян методом АДУ позволяет активизировать энергию их прорастания, увеличить полевую всхожесть и сократить время полевой всхожести, что особенно важно в засушливый период [2—4].

Исследованиями было установлено, что обработка методом АДУ семян яровой пшеницы сорта Ладья, озимого тритикале сорта Динамо способствовала улучшению посевных качеств, что проявлялось в повышении лабораторной всхожести, устойчивости к основным возбудителям заболеваний и сохранности растений на уровне 90...93 %. Кроме того, наблюдалась активизация ростовых процессов на начальных этапах развития, что привело к увеличению сырой биомассы на 24,9 % у проростков пшеницы и 17,9 % — тритикале по сравнению с необработанными образцами. При этом отмечалось большее стимулирующее действие после воздействия метода АДУ на развитие корней по сравнению с надземной частью у 21-дневных проростков. Этот факт важен с точки зрения усиления роли тритикале в почвообразующих процессах, так как более мощная корневая система оказывает большее связывающее действие с почвой [5].

По мнению авторов, применение метода АДУ особенно актуально для Беларуси, где присутствуют резко меняющиеся климатические условия. В таких условиях возрастает потребность в эффективных методах повышения урожайности с минимальными затратами на химические удобрения.

Разработанная установка АДУ для предпосевной обработки семян кукурузы представлена на рисунке 1.

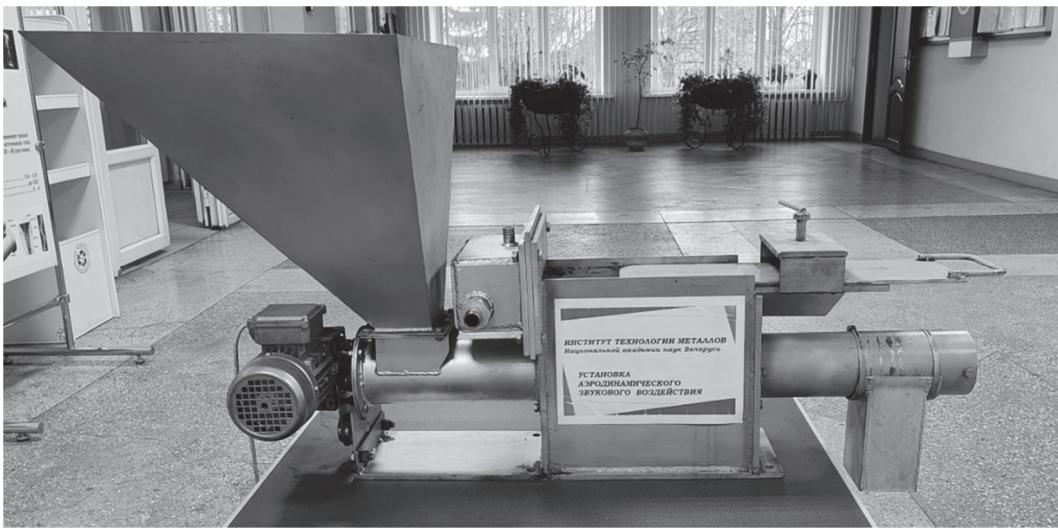


Рисунок 1. — Установка АДУ для предпосевной обработки семян кукурузы

Материалы и методы исследования. Исследованиям на предмет повышения урожайности методом АДУ подвергались семена кукурузы сорта 美联98 (Американская лига 98), страна происхождения — Китай (рисунок 2). Для проведения исследования на территории ИТМ НАН Беларуси был разработан участок неосвоенной земли (рисунок 3), разделенный на четыре равных сектора площадью $3,24 \text{ м}^2$ каждый.

Для создания идентичных условий в каждый сектор засеяно по 26 зерен кукурузы, схема расположения точек посева указана на схеме (рисунок 4).

Каждому сектору присвоено обозначение согласно режиму обработки: K — контрольный сектор (семена не подвергались обработке методом АДУ); I — семена обрабатывались на режиме № 1 (резонансная частота — 148 Гц) установки АДУ; 2 — семена обрабатывались на режиме № 2 (резонансная частота — 156 Гц) установки АДУ; 3 — семена обрабатывались на режиме № 1, а затем на № 2 работы установки АДУ. Время воздействия на каждом из режимов — 0,5 мин.



Рисунок 2. — Упаковка зерна кукурузы



Рисунок 3. — Разработка участка неосвоенной земли на территории ИТМ НАН Беларуси

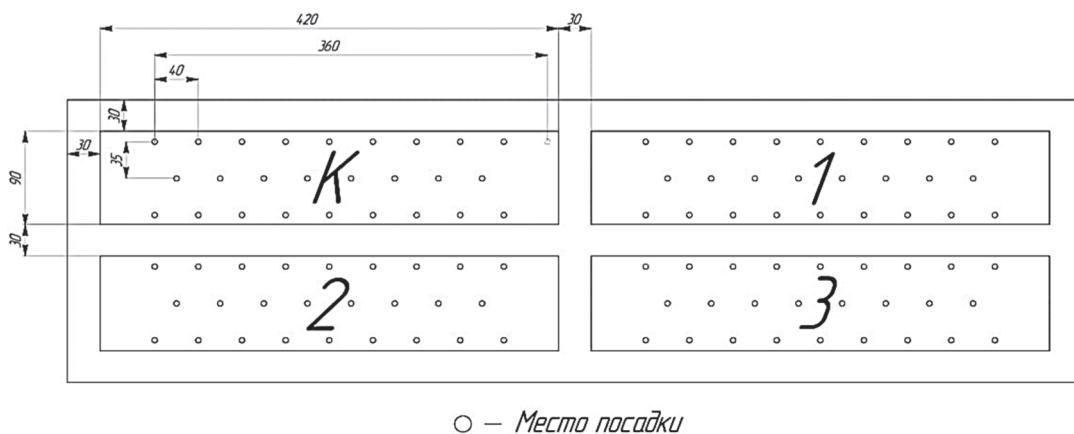


Рисунок 4. — Схема расположения секторов засева исследуемыми зернами кукурузы

Используемая установка АДУ, предназначенная для предпосевной обработки семян кукурузы, характеризуется рядом конструктивных особенностей, среди которых особое значение имеет наличие шнекового механизма. Шнек обеспечивает транспортировку обрабатываемого зерна через центр резонансной камеры. Перемещение семян осуществляется с заданной скоростью, что достигается благодаря подбору редуцирующего устройства, соединяющего асинхронный электрический двигатель со шнеком. Установка АДУ имеет возможность регулировки оборотов шнека для изменения времени нахождения семян в зоне действия резонансной камеры. Такое техническое решение обеспечивает равномерность обработки всего объема зерна.

Для удобства эксплуатации и повышения производительности установки АДУ предусмотрены дополнительные элементы конструкции. Для непрерывной подачи обрабатываемых семян в рабочую зону шнека применяется загрузочный растрруб объемом не менее $0,5 \text{ м}^3$. После обработки семян в резонансной камере они транспортируются к разгрузочному отводу, через который происходит их выгрузка непосредственно в мешки или тару. Такая схема исключает временные затраты на загрузку и выгрузку обрабатываемого зерна кукурузы, а также поддерживает непрерывный цикл работы установки АДУ.

К преимуществу данной установки АДУ, предназначеннной для предпосевной обработки семян кукурузы, помимо ее непрерывной работы, также относится отсутствие необходимости в глубоких специальных знаниях или сложных навыках у оператора.

Результаты исследования и их обсуждение. 24 мая 2024 года на базе ИТМ НАН Беларуси осуществлена предпосевная обработка трех партий семян кукурузы сорта Американская лига 98 методом АДУ на трех режимах.

Посев обработанных и необработанных семян производился 26 мая 2024 года согласно схеме, отображенной на рисунке 4. Удобрения не применялись.

Контроль в течение лета 2024 года показал, что растения, выращенные из семян кукурузы, обработанных методом АДУ на режимах № 2 и № 3, растут быстрее своих аналогов из секторов К и I на 6...12 % (рисунок 5).

Замеры высоты растений производились еженедельно (рисунок 6) и приведены в таблице 1.

Интенсивный рост растений в высоту на всех четырех секторах прекратился на 11-й неделе после посева.

На 12-й неделе после посева зафиксировано наличие початков кукурузы на всех засеянных секторах, на растениях в секторе 3 количество початков превосходило остальные: К — 15 шт.; I — 16 шт.; 2 — 13 шт.; 3 — 24 шт.

1 октября 2024 года, спустя 18 недель после посева, произведена уборка с поля, взвешивание силосной массы и початков.

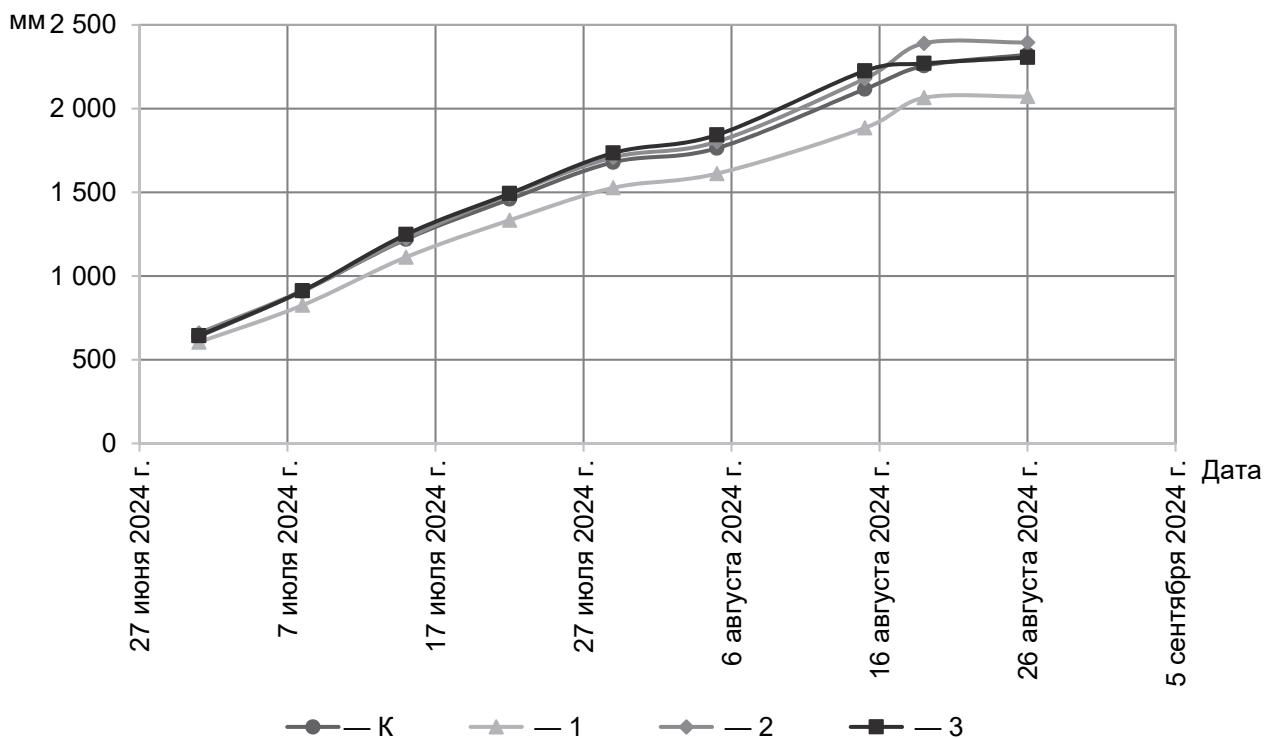


Рисунок 5. — Динамика роста исследуемых ростков кукурузы сорта Американская лига 98



Рисунок 6. — Замер высоты на 2-й (а) и 10-й (б) неделях после посадки ростков кукурузы сорта Американская лига 98

Таблица 1. — Высота ростков кукурузы в течение всего периода роста (средние значения)

Дата	Высота ростков в секторах, мм			
	K	1	2	3
03.06.2024	56	61	68	65
10.06.2024	160	153	176	167
17.06.2024	248	245	278	262
24.06.2024	398	394	422	417
01.07.2024	639	604	659	643

Окончание таблицы 1

Дата	Высота ростков в секторах, мм			
	K	1	2	3
08.07.2024	909	825	914	912
15.07.2024	1 220	1 113	1 225	1 248
22.07.2024	1 459	1 333	1 487	1 493
29.07.2024	1 680	1 527	1 709	1 735
05.08.2024	1 764	1 612	1 802	1 843
15.08.2024	2 117	1 885	2 179	2 225
19.08.2024	2 256	2 065	2 390	2 270
26.08.2024	2 323	2 069	2 313	2 306
02.09.2024	2 324	2 071	2 396	2 309
09.09.2024	2 327	2 071	2 397	2 309
16.09.2024	2 329	2 072	2 398	2 310

Результаты взвешивания силосной массы и початков представлены в таблице 2.

2 октября 2024 года произведено лущение (отделение зерна от початков), подсчет и взвешивание сырого зерна кукурузы.

2—11 октября 2024 года производилась сушка зерна (рисунок 7) с последующим взвешиванием сухого зерна, результаты приведены в таблицах 3, 4.

Результаты определения урожайности масштабирования замеров, приведенных в таблицах 2, 3, до размерности «центнер на гектар» приведены в таблице 5.

Т а б л и ц а 2 . — Результаты взвешивания силосной массы и початков

Сектор	Вес силосной массы, кг	Процентное соотношение, %	Вес початков, кг	Процентное соотношение, %
K	13,60	100,0	3,845	100,0
1	13,75	101,1	4,020	104,6
2	16,80	123,5	4,865	126,5
3	16,90	124,3	5,165	134,3

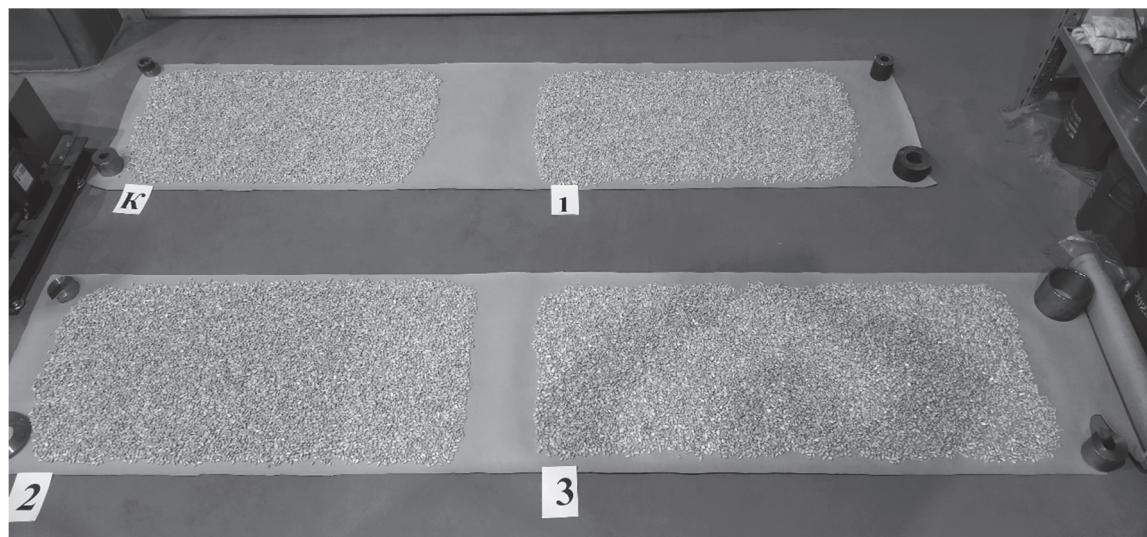


Рисунок 7. — Сушка зерна кукурузы сорта Американская лига 98

Таблица 3. — Результаты взвешивания зерна кукурузы до и после сушки

Сектор	Вес сырого зерна, кг	Процентное соотношение, %	Вес сухого зерна, кг	Процентное соотношение, %	Степень усушки, %
<i>K</i>	2,825	100,0	1,845	100,0	34,7
1	2,880	101,9	1,850	100,3	35,8
2	3,550	125,7	2,265	122,8	36,2
3	3,885	137,5	2,540	137,7	34,6

Таблица 4. — Результаты подсчета зерен кукурузы

Сектор	Количество зерен, шт.	Процентное соотношение, %	Средний вес одного зерна после сушки, г	Процентное соотношение, %
<i>K</i>	8 764	100,0	0,21	100,0
1	8 994	102,6	0,21	100,0
2	10 526	120,1	0,21	100,0
3	10 669	121,7	0,24	114,3

Таблица 5. — Расчет урожайности кукурузы в масштабе на гектар

Сектор	Урожайность силоса		Урожайность сырого зерна		Урожайность сухого зерна	
	т / га	повышение, %	ц / га	повышение, %	ц / га	повышение, %
<i>K</i>	419,69	100,0	87,19	100,0	56,94	100,0
1	424,32	101,1	88,89	101,9	57,10	100,3
2	518,45	123,5	109,57	125,7	69,91	122,8
3	521,53	124,3	119,91	137,5	78,40	137,7

Урожайность определялась по зависимости

$$Y = \frac{W10^6}{LH},$$

где *W* — вес, кг;

L — длина участка, см;

H — ширина участка, см.

Заключение. Предложен высокоеффективный метод повышения урожайности зерновых культур — метод АДУ, основанный на воздействии перед посевной на семена энергией от резонансных волн звуковой частоты. Разработана специальная промышленная установка, реализующая метод АДУ, принцип работы которой основан на возбуждении волн звуковой частоты при прохождении воздушного потока через сопла установки.

По результатам сравнительных исследований, проведенных в условиях ИТМ НАН Беларусь, установлено, что применение метода АДУ при предпосевной обработке семян позволило повысить урожайность кукурузы сорта Американская лига 98 при уборке на зерно на 137,7 %, при уборке на силос — на 124,3 %. Для кукурузы сорта Американская лига 98 рекомендован режим № 3 работы установки АДУ.

Учитывая экологические условия Республики Беларусь, применение метода АДУ может стать важным инструментом для повышения устойчивости агроэкосистем. Метод не

только способствует увеличению урожайности кукурузы, но и помогает минимизировать негативное воздействие на окружающую среду за счет уменьшения доли использования химических удобрений. В условиях, когда экология и устойчивое развитие становятся важнейшими приоритетами в сельском хозяйстве, использование современных технологий, таких как метод АДУ, может открыть новые возможности для агросектора.

Список цитируемых источников

1. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. — Могилев : МГУП, 2019. — 213 с.
2. Жигалов, А. Н. Биологизированное повышение урожайности яровой пшеницы «Сабина» посредством аэродинамического воздействия / А. Н. Жигалов, А. В. Кучумов, Г. Ф. Шатуров // Актуальные вопросы развития органического сельского хозяйства : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Смоленск, 16 окт. 2018 г. / М-во сельского хоз-ва Рос. Федерации, Смол. гос. с.-х. акад. ; отв. ред. С. Е. Терентьев. — Смоленск : СГСХА, 2018. — С. 33—39.
3. Жигалов, А. Н. Влияние аэродинамического звукового резонансного воздействия на повышение урожайности сельскохозяйственных культур / А. Н. Жигалов // Техника и технологии в сельскохозяйственном производстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Уссурийск, 29—30 апр. 2021 г. / Примор. гос. с.-х. акад. — Уссурийск : Примор. ГСХА, 2021. — С. 43—49.
4. Влияние аэродинамического упрочнения на начальный рост пшеницы и тритикале / С. В. Абраскова, Н. П. Шишлова, Е. С. Бурдь, Д. А. Плавский // Векторы инновационного развития : материалы I Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 11 дек. 2020 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи : БарГУ, 2020. — Ч. 1. — С. 111—112.

Поступила в редакцию 08.04.2025.

УДК 631.362.3

А. И. Ермаков¹, кандидат технических наук, доцент,
С. А. Зеленко², кандидат технических наук,
А. А. Язенков³

^{1, 2}Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, 220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 293 95 04, [1ermakov@bntu.by](mailto:ermakov@bntu.by), [2sergey-zelenko@mail.ru](mailto:sergey-zelenko@mail.ru)

³Закрытое акционерное общество «Борисовский завод “Металлист”», ул. 1-го Июля, 6, ком. 1, 222520 Борисов, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО КАНАЛА ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

В статье представлены результаты исследования влияния режимных параметров пневматического канала зерноочистительной машины МУЗ-16 на эффективность ее работы. Проведенными исследованиями установлено, что система окончательной аспирации сепаратора МУЗ-16 имеет значительные подсосы воздуха, что снижает эффективность отделения примесей, отличающихся аэродинамическими свойствами. Для предотвращения подсосов воздуха предложена новая схема пневматического канала окончательной аспирации. Рекомендуемые технические решения позволяют практически исключить подсосы воздуха в системе окончательной аспирации.

Ключевые слова: зерноочистительная машина; аспирационная система; пневматический канал; скорость воздуха; расход воздуха.

Рис. 4. Табл. 1. Библиогр.: 13 назв.

A. I. Ermakov¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
S. A. Zelenko², PhD in Technical Sciences,
A. A. Yazenkov³

^{1, 2}Institution of Education “Belarusian National Technical University”, 65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 293 65 05, [1ermakov@bntu.by](mailto:ermakov@bntu.by), [2sergey-zelenko@mail.ru](mailto:sergey-zelenko@mail.ru)

³JSC Borisov Plant Metallist, Room 6, 1 1st July Str., 222520 Borisov, the Republic of Belarus

INVESTIGATION THE IMPACT OF THE PNEUMATIC CHANNEL OPERATING PARAMETERS OF THE GRAIN CLEANING MACHINE

The article presents the findings of a study that investigated the impact of operating parameters on the efficiency of the pneumatic channel of the grain-cleaning machine MUZ-16. The findings of the present study have established that the final aspiration system of the separator MUZ-16 exhibits significant air leaks, which in turn reduces the efficiency of separating impurities with different aerodynamic properties. To address this issue, a novel configuration for the pneumatic channel of the final aspiration system is proposed. The implementation of these novel technical solutions is expected to result in the effective elimination of air leaks within the final aspiration system.

Key words: grain cleaning machine; aspiration system; pneumatic channel; air speed; airflow.

Fig. 4. Table 1. Ref.: 13 titles.

Введение. Зерновой ворох, поступающий на зерноочистительно-сушильные комплексы, состоит из смеси основной зерновой культуры, сорной и зерновой примеси [1]. Определяющим звеном, влияющим на сохранность зерна, является предварительная очистка (сепарирование). Сепарирование — разделение неоднородной зерновой смеси на составляющие ее компоненты, которое проводят в зерноочистительных машинах (сепараторах). Принцип их работы и конструкция рабочих органов позволяют разделять зерновой ворох на фракции, различающиеся физико-механическими свойствами отдельных компонентов, которые являются предметами исследований отечественных и зарубежных ученых: В. В. Гортинский, Н. П. Сычугов [1], А. Д. Галкин [2], А. М. Гиевский [3], В. А. Николаев [4], С. Ф. Сороченко [5] и др. [6—13]. Наиболее распространенные зерноочистительные машины в настоящее время являются воздушно- ситовые сепараторы, выделяющие примеси, отличающиеся геометрическими размерами и аэродинамическими свойствами.

В Республике Беларусь наложен выпуск широкой гаммы зерноочистительного оборудования, в том числе воздушно-ситовых сепараторов. Ведущими производителями машин для очистки и сортировки зерна являются СООО «Элазер» и компания «Полымя» (ЗАО «Борисовский завод «Металлист»»).

Материалы и методы исследования. Для проведения экспериментальных исследований по изучению влияния режимных параметров пневматического канала зерноочистительной машины МУЗ-16 на эффективность ее работы был изготовлен экспериментальный стенд (рисунок 1) [13].

Разработанный экспериментальный стенд выполнен таким образом, что его конструкция позволяет изменять и регулировать конструктивные и режимные параметры лабораторного макета второго аспирационного канала машины универсальной зерноочистительной МУЗ-16: скорость и расход воздуха в канале, подачу исходной смеси зерна, размеры аспирационного канала.

На основе анализа литературной информации о проведенных экспериментальных исследованиях процесса воздушного сепарирования различных зерновых культур определены основные режимно-конструктивные параметры аспирационного канала МУЗ-16, которые оказывают влияние на эффективность процесса сепарирования.

Технологическая эффективность процессов сепарирования в зерноочистительных машинах определяется следующими основными показателями:

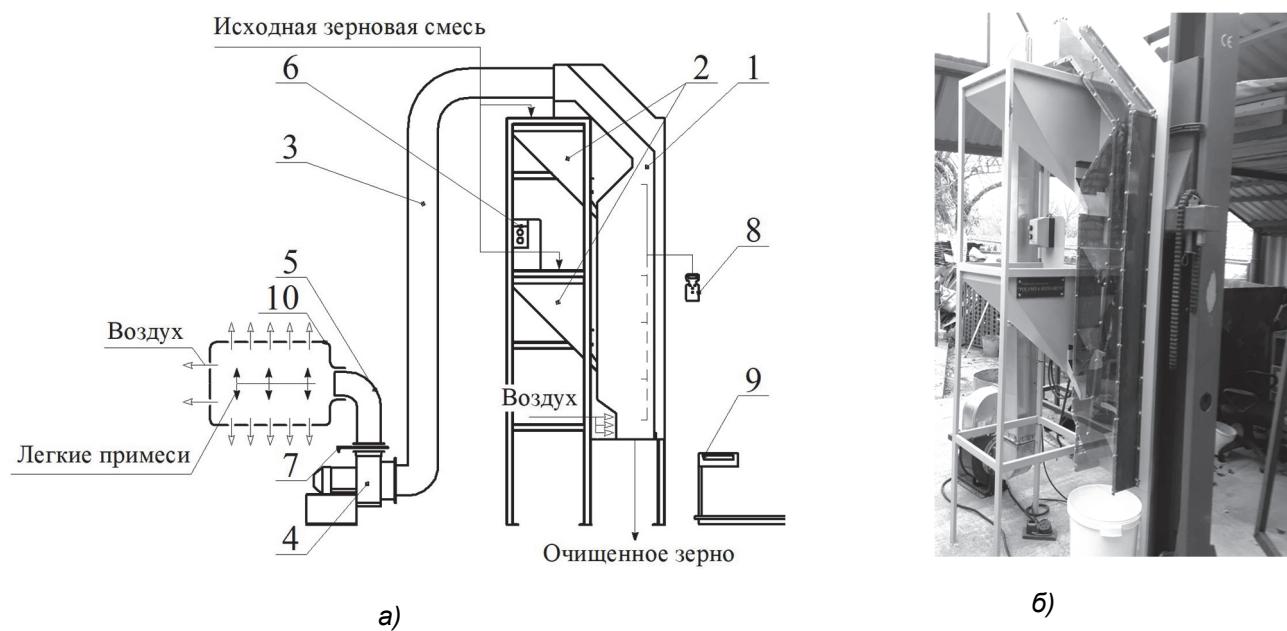
- производительностью:

$$Q = 3600M / \tau_c,$$

где Q — производительность, кг / ч;

M — количество исходной зерновой массы, поступающей на сепарирование, кг;

τ_c — время сепарирования, с;



а — схема экспериментального стенда; б — общий вид экспериментального стенда; 1 — лабораторный макет пневматического канала окончательной аспирации МУЗ-16; 2 — бункера для исходной зерновой смеси; 3, 5 — воздуховод; 4 — вентилятор; 6 — магнитный пускатель двигателя вентилятора; 7 — заслонка; 8 — термоанемометр; 9 — весы; 10 — фильтровальная перегородка

Рисунок 1. — Схема экспериментального стенда

– удельной производительностью:

$$q_{уд} = Q / B,$$

где $q_{уд}$ — удельная производительность сепаратора, кг / (ч · см);

B — ширина аспирационного канала, см;

– коэффициентом очистки от примесей:

$$E = 100(M_{исх} - M_{сем}) / M_{исх},$$

где E — коэффициент очистки, %;

$M_{исх}$ — количество аэродинамически отделимых примесей в исходной зерновой массе, кг;

$M_{сем}$ — количество аэродинамически отделимых примесей в очищенных семенах, кг.

Принцип воздушного сепарирования, осуществляемый в вертикальном аспирационном канале, заключается в подаче зерновой смеси в канал и продувании ее восходящим воздушным потоком, при этом очень важными параметрами воздушного потока являются скорость воздуха и распределение воздушного потока в поперечном сечении канала:

$$\nu = (V - V_{\Pi}) / F,$$

где ν — скорость воздуха в поперечном сечении канала, м / с;

V — объемная производительность вентилятора, м³ / с;

V_{Π} — объем подсосов воздуха из отверстий, расположенных выше поперечного сечения канала, в которое подается зерновая смесь, м³ / с;

F — площадь поперечного сечения аспирационного канала в месте подачи зерновой смеси, м².

После обобщения результатов предварительной серии экспериментов по исследованию влияния режимных параметров аспирационного канала на направление движения и скорости в нем воздушных потоков в качестве входных факторов и их интервалов, оказывающих значительное влияние на процесс аэросепарирования, были выбраны:

– удельная производительность сепаратора $q_{уд} = 0 \dots 666$ кг / (ч · см);

– объемная производительность вентилятора $V = 0,14 \dots 0,4$ м³ / с.

В качестве выходных параметров, характеризующих эффективность аэросепарирования, были приняты:

– скорость воздуха в поперечном сечении канала ν , м / с;

– объем подсосов воздуха из отверстий, расположенных выше поперечного сечения канала, в которое подается зерновая смесь, V_{Π} , м³ / с;

– объем забора воздуха через заборную решетку воздуха в канал V_3 , м³ / с.

Результаты исследования и их обсуждение. Для проведения экспериментальных исследований был спланирован и проведен полнофакторный эксперимент, который позволил подобрать оптимальное количество необходимых опытов и увеличить точность обработки полученных экспериментальных данных. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 1.

На основании данных таблицы 1 построены диаграммы, показывающие зависимость количества подсосов воздуха от удельной подачи (рисунок 2).

Из диаграмм видно, что подсосы воздуха во всех экспериментах колеблются от 51,53 до 24,08 %. При этом прослеживается тенденция к снижению количества подсосов с увеличением расхода вентилятора.

На рисунке 3 представлены диаграммы, показывающие зависимость количества подсосов от удельной производительности при фиксированных значениях расхода воздуха в вентиляторе.

Т а б л и ц а 1. — Результаты экспериментальных исследований влияния режимных параметров аспирационного канала на направление движения и скорости в нем воздушных потоков

Номер опыта	Входные параметры		Выходные параметры		
	$q_{уд}$, кг / (ч · см)	V , м ³ / с	$V_{п}$, м ³ / с	V_3 , м ³ / с	v , м / с
1	0	0,15	0,07729	0,0174	2,840313
2	0	0,2	0,093	0,03016	4,179688
3	0	0,3	0,14933	0,03248	5,885625
4	0	0,4	0,17312	0,03016	8,8625
5	222	0,15	0,07512	0,01856	2,925
6	222	0,2	0,08602	0,03016	4,4525
7	222	0,3	0,12172	0,03712	6,964063
8	222	0,4	0,15108	0,03944	9,723438
9	444	0,15	0,05736	0,02088	3,61875
10	444	0,2	0,07406	0,02204	4,919375
11	444	0,3	0,12224	0,02343	6,94375
12	444	0,4	0,1398	0,02552	10,16406
13	666	0,15	0,05632	0,01392	3,659375
14	666	0,2	0,05744	0,0167	5,56875
15	666	0,3	0,08336	0,02088	8,4625
16	666	0,4	0,09632	0,02552	11,8625

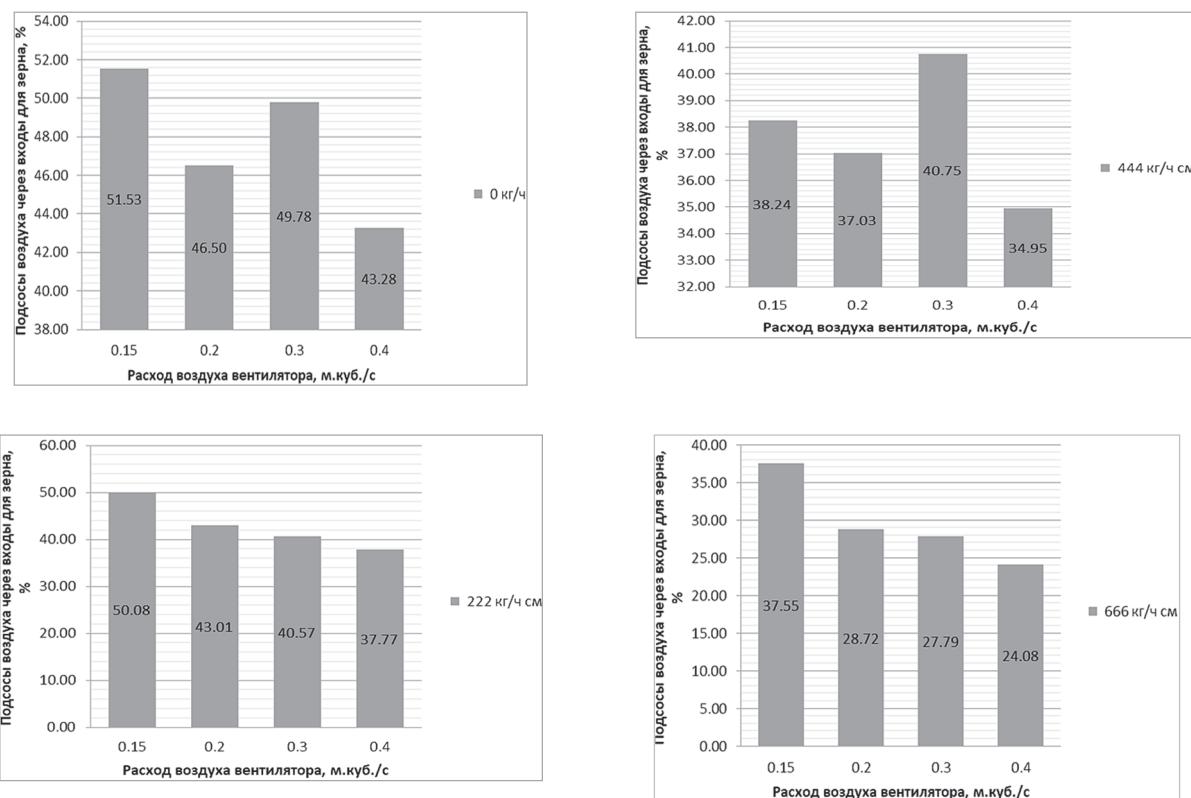


Рисунок 2. — Зависимости подсоса воздуха от расхода вентилятора при различной удельной подаче продукта в аспирационный канал

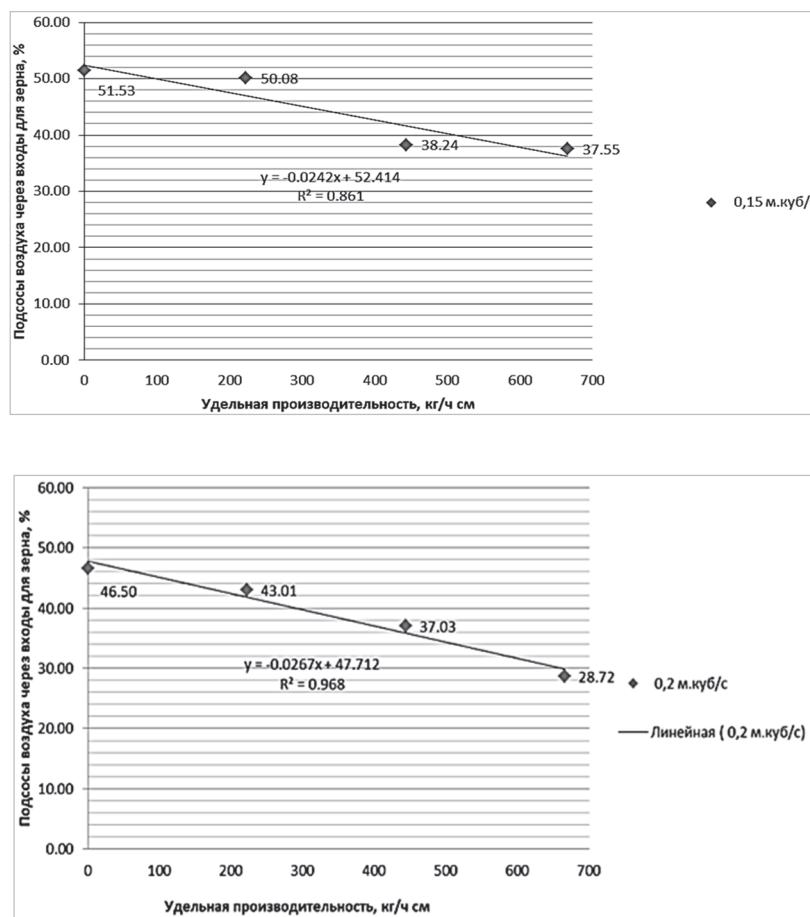


Рисунок 3. — Зависимости количества подсосов от удельной производительности при фиксированных значениях расхода воздуха в вентиляторе

Из диаграмм на рисунке 3 видно, что с увеличением удельной производительности количество подсосов снижается с 51,53 до 37,55 % при расходе воздуха 0,15 м³ / с и с 46,5 до 28,72 % при расходе воздуха 0,2 м³ / с.

Из таблицы 1 видно, что при расходе воздуха в вентиляторе 0,3 м³ / с и выше скорость воздуха v , м / с, превышает 5,5 м / с, наблюдается унос зерна вместе с примесями, о чем свидетельствуют данные протоколов экспериментальных исследований. Можно сделать вывод, что дальнейшие исследования влияния режимных и конструктивных параметров аспирационного канала на направление движения и скорости в нем воздушных потоков следует проводить при расходе воздуха, не превышающем 0,2 м³ / с.

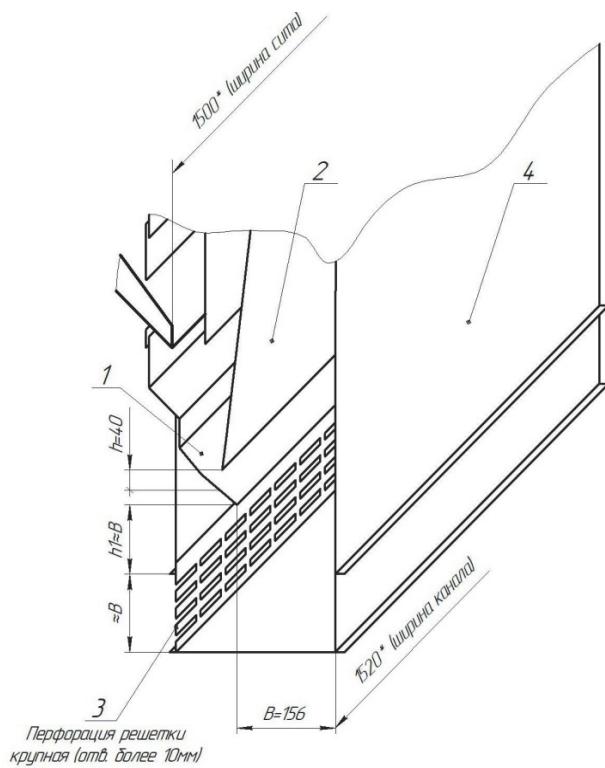
Также из экспериментальных данных таблицы 1 видно, что расход воздуха через заборную решетку канала незначителен и колеблется от 15,08 до 6,38 % от расхода вентилятора при различных режимных параметрах вентилятора.

Из анализа экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

- подсосы воздуха через отверстия для подачи зерновой массы в канал во всем диапазоне исследуемых режимных параметров составляют от 51,53 до 24,08 %, что значительно снижает эффективность работы аспирационного канала;

- расход воздуха через заборную решетку канала незначителен и колеблется от 15,08 до 6,38 % от расхода вентилятора, что свидетельствует о неудачном расположении заборной решетки и коррелирует с данными компьютерного моделирования.

Для предотвращения подсосов воздуха предложена новая схема и рекомендуемые параметры пневматического канала окончательной аспирации зерноочистительного сепаратора МУЗ-16 (рисунок 4).



1 — пластина для поступления зерна в канал; 2 — передняя стенка канала; 3 — заборная решетка для воздуха; 4 — задняя стенка аспирационного канала;
 B — глубина пневматического канала

Рисунок 4. — Схема и рекомендуемые параметры пневматического канала окончательной аспирации зерноочистительного сепаратора МУЗ-16

Предложенная новая конструкция пневматического канала окончательной аспирации позволит практически исключить подсосы воздуха при максимальной производительности машины 100 т / ч, но при минимальной производительности 16 т / ч величина подсосов через зазор h составит не более 10 % от расхода воздуха аспирационной системы.

Компания «Полымя» планирует изготовить опытный образец зерноочистительного сепаратора МУЗ-16 с учетом предложенных технических решений. В процессе проведения производственных испытаний будет проводиться оценка эффективности предложенных технических решений и целесообразность их применения в серийном производстве.

Заключение. В результате анализа экспериментальных данных по исследованию влияния режимных параметров пневматического канала зерноочистительного сепаратора МУЗ-16 были выявлены основные причины снижения эффективности сепарирования зернового вороха. Для устранения выявленных недостатков была предложена новая схема пневматического канала окончательной аспирации зерноочистительного сепаратора МУЗ-16. Новые технические решения позволяют практически исключить подсосы воздуха, что, в свою очередь, позволяет повысить эффективность процесса сепарирования. Во время производственных испытаний компанией «Полымя» будет проведена техническая и технологическая оценка предложенных решений и установлена целесообразность их применения в серийном производстве.

Работа выполнена в рамках договора на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы с закрытым акционерным обществом «Борисовский завод “Металлист”» от 15.09.2023 № ВНК-0923.

Список цитируемых источников

1. Сычугов, Н. П. Машины, агрегаты и комплексы послеуборочной обработки зерна и семян трав : монография / Н. П. Сычугов, Ю. В. Сычугов, В. И. Исупов. — Киров : ВЕСИ, 2015. — 404 с.
2. Галкин, А. Д. Машины и оборудование послеуборочной обработки зерна и подготовки семян из влажного комбайнового вороха : рекомендации / А. Д. Галкин, В. Д. Галкин. — Пермь : Прокрость, 2020. — 47 с.
3. Обоснование размеров осадочных камер двухаспирационной пневмосистемы зерноочистительной машины / А. М. Гиевский, В. И. Оробинский, А. В. Чернышов [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. — 2016. — № 4. — С. 87—95.
4. Николаев, В. А. Параметры траектории зерновки после касания решета полуавтоматической зерноочистительной машины / В. А. Николаев // Аграрный вестник Верхневолжья. — 2020. — № 2. — С. 71—76.
5. Сороченко, С. Ф. Применение центробежно-воздушного сепаратора для модернизации стационарной технологической линии очистки зерна / С. Ф. Сороченко, Н. И. Стрикунов, С. В. Леканов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2023. — № 5 (223). — С. 78—85.
6. Поздняков, В. М. Повышение эффективности подготовки семенного материала на основе совершенствования конструкции сепаратора вибропневматического принципа действия / В. М. Поздняков, С. А. Зеленко, А. И. Ермаков // Вестник БГСХА. — 2014. — № 1. — С. 163—167.
7. Повышение эффективности работы двухаспирационной пневмосистемы универсальной воздушно-решетной зерноочистительной машины / А. М. Гиевский, А. П. Тарабенко, В. И. Оробинский, А. В. Чернышов // Тракторы и сельхозмашины. — 2014. — № 5. — С. 32—34.
8. Бурков, А. И. Тенденции развития воздушно-решётных зерноочистительных машин на современном этапе / А. И. Бурков // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. — 2018. — № 2 (63). — С. 4—15.
9. Two-aspiration air-sieve grain cleaning machines of new generation / V. I. Orobinsky [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2022. — Vol. 954, no. 1. — P. 12—26.
10. Development and theoretical studies of grain cleaning machine for fractional technology of flattening forage grain / P. Savinyh [et al.] // Proceedings of 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development Engineering for Rural Development. — 2018. — P. 124—130.
11. Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine / I. Badretdinov [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. — 2019. — Vol. 17, no. 4. — P. 529—534.
12. Пути совершенствования решет зерноочистительных машин / У. К. Сабиев, А. Ю. Головин, С. Е. Шакарова, С. Г. Ахметов // Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях. — 2019. — С. 358—360.
13. Ермаков, А. И. Совершенствование аспирационной системы зерноочистительной машины / А. И. Ермаков, С. А. Зеленко // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». — 2024. — № 1 (15). — С. 45—51.

Поступила в редакцию 06.02.2025.

УДК 631.3:636

А. В. Китун¹, доктор технических наук, профессор,**П. Ю. Крупенин²**, кандидат технических наук, доцент¹Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, ktmg@batu.edu.by²Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», ул. Мичурина, 5, 213407 Горки, Республика Беларусь, pavel@krupenin.com

АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ КОРМЛЕНИЯ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА

Процесс приготовления и выдачи полнорационных кормовых смесей является сложной биотехнической целенаправленной системой «человек → машина → корм → животное». Адресатом этой системы является животное с его потребностями в питательных веществах для получения планируемой продуктивности, которая представлена определенным набором кормов и кормовых добавок.

В ходе анализа различных конструктивных исполнений стационарных систем раздачи кормов животным установлено, что наибольшее распространение получили кормораздающие устройства на основе конструкции ленточных конвейеров и роботизированных координатных кормораздатчиков. Автоматизация технологических систем кормления животных позволяет исключить ручные трудозатраты при раздаче кормов животным и повысить точность выполнения технологических операций.

При обосновании состава и основных технологических параметров стационарной системы раздачи кормов животным необходимо учитывать не только численность обслуживаемого поголовья животных, но и технические особенности загрузочных устройств, а также геометрические характеристики животноводческих и вспомогательных помещений.

Ключевые слова: стационарный кормораздатчик; кормовая смесь; автоматизация; робот-кормораздатчик; крупный рогатый скот.

Рис. 2. Табл. 3. Библиогр.: 8 назв.

A. V. Kitun¹, DSc in Technical Sciences, Professor,

P. Y. Krupenin², PhD in Technical Sciences, Associate Professor

¹Institution of Education “Belarusian State Agrarian Technical University”,
99 Nezalezhnosti Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, ktmg@batu.edu.by

²Institution of Education “Belarusian State Agricultural Academy”,
5 Michurina Str., 213407 Horki, the Republic of Belarus, pavel@krupenin.com

ANALYSIS AND RATIONALE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF STATIONARY CATTLE FEEDING SYSTEMS

The process of preparing and dispensing complete feed mixtures is a complex biotechnical-targeted system involving the following elements: human operator, machine, feed, and animal. The system is designed to address the nutritional needs of animals, with the objective of achieving the desired level of productivity. This productivity is represented by a specific set of feeds and feed additives.

A thorough analysis of various design iterations of stationary systems for distributing feed to animals revealed that feed distributing devices based on the design of belt conveyors and robotic coordinate feed dispensers are the most widely utilised. The automation of feeding systems for animals has been shown to eliminate manual labour costs and enhance the precision of operational processes.

When substantiating the composition and main technological parameters of a stationary system for distributing feed to animals, it is necessary to take into account not only the number of animals served, but also the technical features of the loading devices, as well as the geometric characteristics of livestock and auxiliary premises.

Key words: stationary feed distributor; feed mixture; automation; robotic feed distributor; cattle.

Fig. 2. Table 3. Ref.: 8 titles.

Введение. Рост производства продукции животноводства, снижение затрат кормов и труда на единицу продукции немыслимы без рационального использования кормов и машин для механизации процессов по их подготовке в соответствии с зоотехническими требованиями и доставки в кормушки животных.

Известно, что процесс приготовления и выдачи полнорационных кормовых смесей является сложной биотехнической целенаправленной системой «человек → машина → корм → животное». Адресатом этой системы является животное с его потребностями в питательных веществах для получения планируемой продуктивности, которая представлена определенным набором кормов и кормовых добавок [1].

В то же время приготовление и раздача кормовых смесей на животноводческих фермах являются процессами энерго- и трудоемкими, требующими значительных дополнительных затрат на строительство кормоцехов, приобретение и последующую эксплуатацию машин и оборудования [2].

Среди номенклатуры технических средств для приготовления и раздачи кормов на животноводческих фермах и комплексах следует выделить группу стационарно установленного в животноводческом помещении оборудования, обеспечивающего высокую, вплоть до третьего уровня, автоматизацию данного технологического процесса [3].

Методология и методы исследования. Правильная организация раздачи кормов животным имеет важное значение. По трудоемкости она составляет 30...40 % от общих трудовых затрат по уходу за животными [1].

К кормораздающим устройствам предъявляются следующие зоотехнические требования:

- отклонение дозы по массе на одну голову для крупного рогатого скота составляет: стебельчатых кормов — 10 %; корнеклубнеплодов — 15 %; комбикормов и концентрированных кормов — 5 %; минеральных добавок — 5 %;
- продолжительность операции раздачи кормов в одном помещении не должна превышать 30 мин при использовании мобильных средств, 20 мин — при раздаче стационарными средствами;
- кормораздатчики должны быть универсальными в отношении возможности выдачи всех видов кормов;
- применяемые технические средства должны иметь высокую производительность и возможность регулирования нормы выдачи на одну голову в пределах, полностью охватывающих весь диапазон вариаций кормового рациона;
- оборудование должно создавать минимальный уровень шума в помещении, механизированно очищаться от остатков корма, быть безопасным и надежным в эксплуатации.

В ходе теоретических исследований применялись методы анализа, классификации, дедукции и синтеза.

Результаты исследования и их обсуждение. Стационарные раздатчики — установки, смонтированные в одном или нескольких блокированных помещениях и раздающие животным корм по фронту кормления.

Стационарные системы кормления широко представлены ленточными транспортерами — раздатчиками кормов, которые обеспечивают выдачу всех видов кормов (кроме жидких) крупному и мелкому рогатому скоту, лошадям и другим жвачным животным.

Размещаемый в кормушке ленточный транспортер — раздатчик кормов включает в себя кормовой желоб, приводную и натяжную станции, рабочий орган в виде соединенных друг с другом ленты и тяговой цепи, загрузочный бункер, электрооборудование. Конечные выключатели останавливают рабочий орган в крайних положениях хода. Кормовой желоб наряду с направляющей для рабочего органа одновременно образуют кормушку для животных.

Производительность ленточного транспортера можно определить по формуле

$$Q_{\text{л}} = F_{\text{л}} v_{\text{л}} \rho,$$

где $F_{\text{л}}$ — площадь поперечного сечения корма на ленте во время его перемещения, м²;

$v_{\text{л}}$ — скорость ленты, м / с;

ρ — насыпная плотность корма, кг / м³.

Встроенные в кормушки цепочно-скребковые кормораздатчики распространены на фермах для раздачи смесей сухих концентрированных, грубых и сочных кормов, а также влажных мешанок.

Стационарный скребковый кормораздатчик представляет собой горизонтальный цепочно-скребковый транспортер открытого типа, смонтированный на дне желоба кормушки, состоящей из двух параллельных и закольцованных каналов.

При работе цепочно-скребкового кормораздающего транспортера каждый скребок транспортирует порцию корма. Производительность и параметры цепочно-скребкового транспортера можно определить по формуле

$$Q = h_c b_c v_{\text{пп}} \rho \psi k_{\text{пп}},$$

где h_c , b_c — высота и ширина желоба (по внутреннему обмеру) соответственно, м;

$v_{\text{пп}}$ — скорость движения цепи со скребками, м / с;

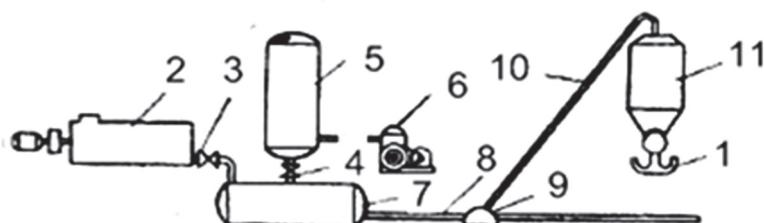
ρ — плотность корма или кормовой смеси, кг / м³;

ψ — коэффициент заполнения желоба кормом;

$k_{\text{пп}}$ — коэффициент, учитывающий влияние угла подъема транспортера.

В качестве стационарных кормораздающих устройств применяются пневмо- и гидро-транспортные установки. Установка для транспортировки и раздачи полужидких кормов (рисунок 1) по трубам (кормопроводам) сжатым воздухом содержит следующие основные сборочные единицы: компрессор, ресивер, продувочный котел, магистральный кормопровод с отводами и устройством для автоматического изменения направления подачи кормов, кормоприемные бункера, кормопроводы-дозаторы с комплектом двусторонних кормушек.

При раздаче приготовленный корм поступает в продувочный котел 7, который после наполнения герметически закрывается. После этого в котел из ресивера 5 подается сжатый воздух, под действием которого корм выталкивается в подсоединененный к конусному днищу котла магистральный кормопровод 8 и транспортируется по нему в бункера-накопители 11, из которых поступает в кормушки 1. Корма могут транспортироваться на расстояния до 500...600 м при давлении сжатого воздуха 0,6...0,8 МПа. Производительность установки варьируется в пределах от 10 до 15 т / ч.



1 — кормушки; 2 — смеситель кормов; 3, 4 — вентили; 5 — ресивер;
6 — компрессор; 7 — продувочный котел; 8 — магистральный кормопровод; 9 — переключатель; 10 — отвод; 11 — бункер-накопитель; 12 — разводящий кормопровод; 13 — смеситель кормов; 14 — насос

Рисунок 1. — Технологическая схема пневматической транспортной установки для раздачи кормов

Фактическая подача ($\text{м}^3 / \text{ч}$) пневмотранспортной кормораздающей установки с одним продувочным котлом определяется по формуле

$$Q_{\Phi} = \frac{W_{\text{п.к}}}{t_3 + t_{\text{п}} + t_{\text{o}}},$$

где $W_{\text{п.к}}$ — полезная вместимость продувочного котла, м^3 ;

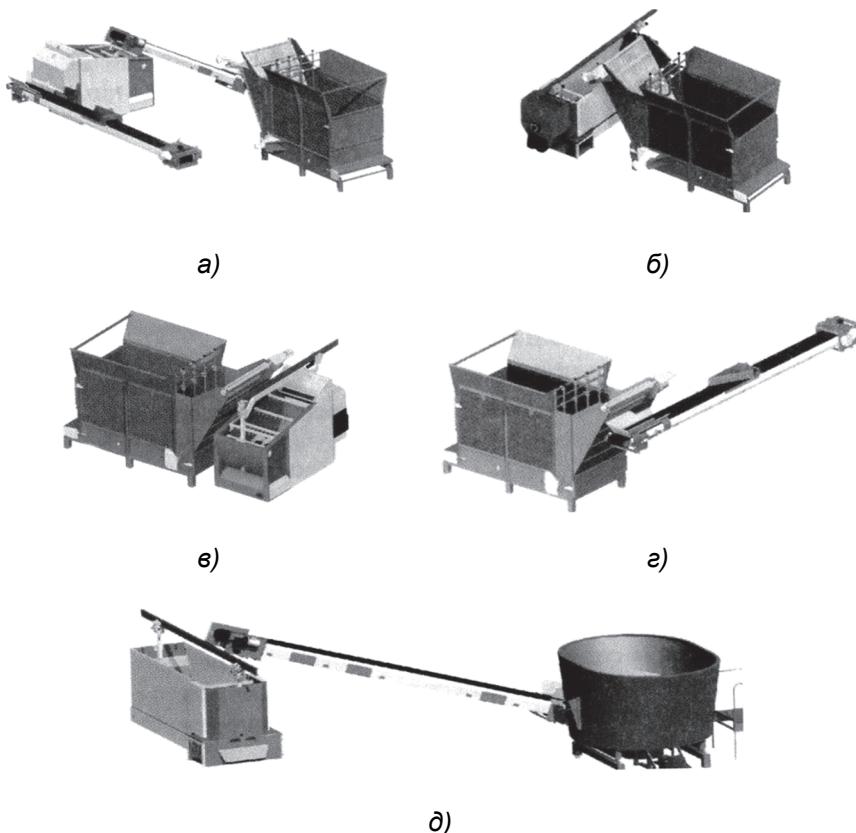
t_3 — время загрузки котла, ч;

$t_{\text{п}}$ — время подачи порции корма, находящейся в котле, в кормоприемный бункер, ч;

t_{o} — потери времени на подготовительно-заключительные операции (открытие и закрытие кранов, задвижек, создание давления в ресивере и котле), ч.

Наиболее выгодным с точки зрения минимизации гидравлических сопротивлений считается диаметр кормопровода, равный 100...150 мм. Если диаметр превышает 150 мм, то это не дает заметного энергетического эффекта, так как потери напора в трубах диаметром 150 мм и, например, 200 мм отличаются незначительно. С другой стороны, использование труб диаметром 200 мм ведет к резкому возрастанию металлоемкости кормопроводной сети.

Производители стационарных технических средств для приготовления и раздачи кормов стремятся в той или иной степени оснастить их автоматизированными системами управления [4—7]. Так, фирма Pellon Group OY (Финляндия) разработала и предлагает потребителям несколько вариантов исполнения стационарных систем раздачи корма для различных технологий содержания животных (рисунок 2).



а — загрузчик + смеситель TMR + ленточный конвейер Pellon Belt Feeder; б — загрузчик + робот-кормораздатчик Pellon Combi; в — загрузчик + робот-кормораздатчик Pellon TMR; г — загрузчик + ленточный конвейер Pellon Belt Feeder; д — смеситель CutMix + ленточный конвейер + робот-кормораздатчик Pellon Silage

**Рисунок 2. — Варианты исполнения
автоматизированных систем фирмы Pellon Group OY**

При беспривязном содержании животных предлагается использовать несколько вариантов исполнения автоматизированной системы кормления животных, основными элементами которых являются робот-кормораздатчик Pellon TMR (см. рисунок 2, а, в—д). Для кормления животных при привязном способе содержания предлагается линия в составе загрузчика и робота-кормораздатчика Pellon Combi (см. рисунок 2, б).

Для реализации предложенных вариантов построения автоматизированных систем кормления животных фирмой разработаны подвесные роботы-кормораздатчики с различными функциональными возможностями. Конструктивное исполнение робота-кормораздатчика Pellon TMR позволяет приготавливать полностью сбалансированные по питательным веществам кормосмеси.

Pellon TMR оборудован электронной системой взвешивания, которая обеспечивает заполнение бункера кормораздатчика исходными компонентами кормосмеси с использованием весового дозирования каждого из них. Система смешивания комбинированная, состоит из конвейера и шнека. Конвейер, захватывая своими гребенками компоненты кормосмеси, перемещает их из нижней части в верхнюю, откуда корм под действием силы тяжести скатывается вниз. Размещенный в середине бункера шnek дополнительно перемешивает кормосмесь в горизонтальном направлении. В результате такого комбинированного воздействия исходные компоненты быстро образуют однородную по составу кормовую смесь.

Установленная мощность электродвигателя привода рабочих органов составляет 2,2 кВт. Электроснабжение кормораздатчика осуществляется от токопроводящей шины, установленной вдоль монорельса. Робот Pellon TMR способен обслужить 200...300 голов крупного рогатого скота.

Для группового кормления животных можно использовать и стационарные автоматизированные технические средства раздачи кормов. Так, фирма Pellon Group OY предлагает потребителям ленточный конвейер Pellon Belt Feeder, который устанавливается в животноводческом помещении над кормовым проходом.

Предварительно приготовленная кормосмесь подается в приемную часть ленточного конвейера и далее ленточным транспортером перемещается над кормовым проходом. Над ленточным транспортером установлено сбрасывающее поворотное устройство в виде клина, которое имеет возможность автономного перемещения вдоль транспортера.

За счет управления перемещением сбрасывающего устройства (вручную или с помощью компьютера Graphics) обеспечивается выдача необходимого количества корма в кормушку или на кормовой стол. Раздача кормов может производиться на левую или правую сторону от ленты транспортера за счет поворота клиновидного сбрасывающего устройства, выполняемого автоматически сервомотором, установленным в конце конвейера. Ширина ленты конвейера — 450 мм, длина — до 80 м, установленная мощность привода — 3 кВт.

Для кормления животных при привязном содержании фирмой Pellon Group OY разработан робот-кормораздатчик Pellon Combi, конструктивное исполнение которого и возможности системы управления позволяют осуществлять индивидуальное кормление животных в соответствии с запрограммированным рецептом.

Отличительная особенность робота — реализованный в его конструкции способ приготовления кормосмеси с помощью поперечного раздаточного ленточного транспортера, оснащенного системой электронного взвешивания. На транспортер дозаторами (работают в согласованном с системой взвешивания режиме) из соответствующих бункеров подается необходимая порция объемистых (силос, сенаж, сено) и концентрированных кормов. Исходные компоненты кормосмеси смешиваются в процессе их подачи на поверхность транспортера. Готовая порция кормосмеси транспортером выгружается конкретному животному в кормушку или на кормовой стол.

Для дозированной раздачи предварительно приготовленной кормосмеси или грубых кормов служат роботы-кормораздатчики Pellon Silage (используются при беспривязном содержании животных). Для раздачи грубых кормов фирма предлагает потребителям роботы-кормораздатчики Pellon 1500 и Pellon 2500.

Технические характеристики роботов-кормораздатчиков фирмы Pellon Group OY представлены в таблице 1.

Таблица 1. — Технические характеристики роботов-кормораздатчиков фирмы Pellon Group OY

Показатель	Модель кормораздатчика					
	Pellon TMR	Pellon Silage	Pellon 2000 Combi	Pellon 3000 Combi	Pellon 1500	Pellon 2500
Вместимость, кг	2 000	2 500	2 100	3 100	1 500	2 500
Ширина ленты, мм	1 100; 1 300; 1 500					
Габаритные размеры, мм						
длина	3 020	3 400	3 100	4 100	2 400	3 400
ширина	1 330	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
высота	2 400	2 050	1 850	1 850	1 850	1 850
Масса, кг	1 200	940	750	965	700	915

Для управления процессом кормления животных фирма Pellon Group OY разработала новое поколение компьютеров Pellon: Pellon Graphics, Pellon PT-400 и Pellon PT-200.

Фирма Mullerup A/S (Дания) предлагает потребителям также различные варианты автоматизированных систем кормления животных, которые по назначению и исполнению в общем аналогичны предыдущим. Так, конструкция роботов-кормораздатчиков Mix Feeder этой фирмы позволяет выполнять приготовление кормосмеси и ее раздачу в животноводческих помещениях с различными системами содержания животных в автоматическом режиме под управлением компьютера МИТ или вручную.

Для кормления молочного стада с большим поголовьем (до 1 000 коров) при беспривязном содержании фирма GEA Farm Technologies (Германия) разработала систему MIX & CARRY, состоящую из подвесного робота-кормораздатчика и стационарного смесителя MVM для приготовления кормосмесей.

Подвесные роботы-кормораздатчики MIX & CARRY с бункером вместимостью 2 или 3 м³ могут обслуживать до 20 групп животных, выдавая им до 30 рационов кормосмесей, перемещаясь при этом со скоростью 8...16 м / мин.

Стационарный смеситель MVM представляет собой бункер с вертикально установленными рабочими органами шнекового типа, оснащенный электронной системой взвешивания компонентов кормовой смеси. Для удовлетворения потребностей ферм с различным поголовьем животных выпускается широкий типоразмерный ряд кормосмесителей (таблица 2).

Шведская фирма DeLaval также предлагает автоматизированные линии приготовления и раздачи кормов для молочно-товарных ферм и комплексов. Автоматические кормораздатчики этой фирмы легко интегрируются в основные системы кормления и могут работать под управлением компьютерной системы ALPRO или стандартного бортового компьютера.

Система ALPRO контролирует процесс автоматического кормления стада и может применяться в сочетании с системой идентификации животных. Если автоматическое распознавание коров не вписывается в конкретную планировку животноводческого помещения, то можно использовать стандартный бортовой компьютер кормораздатчика, имеющий набор базовых функций для кормления коров, в том числе дневной рацион кормления, режимы наращивания и уменьшения выдачи кормов и режим расчетного потребления корма на одну корову.

Таблица 2. — Технические характеристики стационарных смесителей MVM

Показатель	Модель смесителя		
	MVM 6,5/8/10	MVM 14/18	MVM 22/27
Вместимость, м ³	6,5; 8; 10	14; 18	22; 27
Число шнеков, шт.	1	2	2
Число ножей на шнеке, шт.	5	10	14
Установленная мощность, кВт	15	22	30

DeLaval выпускает подвесные кормораздатчики нескольких типов с различными функциональными возможностями. Основной конструктивной особенностью, которой обладают все кормораздатчики DeLaval, является перемещение по монорельсу.

Кормораздатчик RA 135 обеспечивает кормление стада полнорационными кормосмесями и используется на фермах, оборудованных системой добровольного доения коров роботами VMS этой же фирмы. Кормораздатчик спроектирован для частой автоматической раздачи корма в течение 24 ч в сутки, работает в автономном режиме и имеет конструктивную возможность увеличения длины, следовательно, и вместимости бункера (таблица 3).

Обоснование состава и характеристик автоматизированной технологической системы кормления животных начинают с расчета количества кормораздатчиков, необходимых для обслуживания поголовья животных:

$$n_k = \frac{Q_k T_{\text{ц}}}{W_k \eta_t},$$

где Q_k — производительность кормораздатчика за один час сменного времени, т / ч;

$T_{\text{ц}}$ — длительность транспортного цикла, ч;

W_k — грузоподъемность кормораздатчика, т;

η_t — коэффициент использования времени смены кормораздатчика.

Производительность робота-кормораздатчика за один час сменного времени

$$Q_k = m_{\text{ж}} q v_{\text{ср}} L_p k_p,$$

где $m_{\text{ж}}$ — число животных на ферме;

q — количество корма i -го вида, расходуемое по максимальному суточному рациону на одно животное, кг;

$v_{\text{ср}}$ — средняя скорость движения кормораздающего средства, км / ч;

L_p — длина фронта раздачи кормов, км;

k_p — коэффициент загрузки кормораздатчика.

Длительность транспортного цикла робота-кормораздатчика

$$T_{\text{ц}} = t_{\text{раз}} + t_{\text{вспом}},$$

где $t_{\text{раз}}$ — время, затрачиваемое на непосредственную раздачу корма, ч;

$t_{\text{вспом}}$ — время, затрачиваемое на вспомогательные операции, ч;

Т а б л и ц а 3. — Технические характеристики кормораздатчика RA 135

Показатель	Значение
Вместимость бункера, м ³	От 2,5 (увеличивается на 3,7 м ³ с увеличением длины бункера на 1 м)
Минимальная ширина кормового проезда, мм	2 000
Высота расположения монорельса относительно кормового стола, м	2 150
Мощность на привод, кВт биттерного устройства выгрузного транспортера опорных тележек	4 0,37 0,75
Габаритные размеры, мм длина ширина высота	От 3 900 1 350 1 650
Масса, кг	950

$$t_{\text{вспом}} = t_{\text{заг}} + t_{\text{простои}} + t_{\text{ТО}} + t_{\text{рем}},$$

где $t_{\text{заг}}$ — время загрузки, ч;

$t_{\text{простои}}$ — время, затрачиваемое на простой по технологическим причинам, ч;

$t_{\text{ТО}}$ — время, затрачиваемое на техническое обслуживание, ч;

$t_{\text{рем}}$ — время, затрачиваемое на ремонт машины, ч.

Время на загрузку бункера кормораздатчика определим по формуле

$$t_{\text{заг}} = \frac{W_{\text{T}} k_{\text{T}}}{Q_{\text{з-в}}},$$

где W_{T} — полезная грузоподъемность раздатчика кормов, т;

k_{T} — коэффициент использования грузоподъемности кормораздатчика [8];

$Q_{\text{з-в}}$ — средняя гармоническая производительность загрузочно-разгрузочного процесса, т / ч.

Значение средней гармонической производительности загрузочно-разгрузочного процесса кормораздатчика можно определить по формуле

$$Q_{\text{з-в}} = \frac{2Q_{\text{загр}} Q_{\text{выгр}}}{Q_{\text{загр}} + Q_{\text{выгр}}},$$

где $Q_{\text{загр}}$ — производительность загрузчика кормораздатчика, т / ч;

$Q_{\text{выгр}}$ — производительность выгрузного устройства кормораздатчика, т / ч.

Полезная грузоподъемность раздатчика кормов

$$W_{\text{T}} = \frac{V_{\text{раз}} - V_{\text{оборуд}}}{\rho},$$

где $V_{\text{раз}}$ — полный объем бункера кормораздатчика, м³;

$V_{\text{оборуд}}$ — объем оборудования, установленного в бункере кормораздатчика, м³;

ρ — плотность кормосмеси, кг / м³.

Время, затрачиваемое на раздачу кормов животным, можно определить по формуле

$$t_{\text{раз}} = \frac{m_{\text{ж}} L_{\text{разд}}}{v_{\text{разд}}},$$

где $m_{\text{ж}}$ — количество животных, обслуживаемых за один цикл, гол.;

$L_{\text{разд}}$ — длина фронта раздачи кормов на одно животное, м;

$v_{\text{разд}}$ — скорость движения агрегата при раздаче кормов, м / ч.

Стационарные системы кормления крупного рогатого скота, конструктивно выполненные с учетом зоотехнических требований, должны обеспечивать равномерность и точность раздачи корма, его дозировку отдельно каждому животному или группе животных, исключать загрязнение корма, расслаивание его по фракциям, не допускать травмирования животных.

Заключение. В ходе анализа различных конструктивных исполнений стационарных систем раздачи кормов животным установлено, что наибольшее распространение получили кормораздающие устройства на основе конструкции ленточных конвейеров и роботизированных координатных кормораздатчиков. Автоматизация технологических систем кормления животных позволяет исключить ручные трудозатраты при раздаче кормов животным и повысить точность выполнения технологических операций.

При обосновании состава и основных технологических параметров стационарной системы раздачи кормов животным необходимо учитывать не только численность обслуживающего поголовья животных, но и технические особенности загрузочных устройств, а также геометрические характеристики животноводческих и вспомогательных помещений.

Список цитируемых источников

1. Машины и оборудование в животноводстве : учеб. пособие / Д. Ф. Кольга, Ф. И. Назаров, С. А. Костюкевич, А. А. Романович ; ред.: Н. В. Казаровец, Д. Ф. Кольга. — Минск : Беларусь, 2010. — 310 с.
2. Китун, А. В. Основы формирования поточных технологических линий на животноводческой ферме / А. В. Китун, П. Ю. Крупенин // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. — 2021. — № 2. — С. 160—164.
3. Фурсенко, С. Н. Автоматизация технологических процессов сельскохозяйственного производства : учеб. пособие / С. Н. Фурсенко, Е. С. Якубовская, Е. С. Волкова. — Минск : ИВЦ Минфина, 2011.
4. Интеллектуальные технологии в агропромышленном комплексе / И. Н. Шило, Н. К. Толочко, Н. Н. Романюк, С. О. Нукешев ; М-во сел. хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь, БГАТУ. — Минск : БГАТУ, 2016. — 335 с.
5. Роботизированные системы в животноводстве : учеб. пособие / А. А. Науменко, А. А. Чигрин, А. П. Палий [и др.] ; Харьк. нац. техн. ун-т сел. хоз-ва им. Петра Василенко. — Харьков : ХНТУСХ им. Петра Василенка, 2015. — 171 с.
6. Influence of Automatic Feeding Systems on Design and Management of Dairy Farms / F. Da Borso, A. Chiumenti, M. Sigura, A. Pezzuolo // Journal of Agricultural Engineering. — 2017. — Vol. 48. — P. 48—52.
7. Купреенко, А. И. Автоматические системы кормления на молочных фермах КРС / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, С. М. Михайличенко // Вестник Брянской ГСХА. — 2018. — № 3 (67). — С. 32—37.
8. Китун, А. В. Проектирование мобильных транспортных потоков на животноводческом предприятии / А. В. Китун, П. Ю. Крупенин, А. А. Романович // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. — 2021. — № 2. — С. 184—190.

Поступила в редакцию 03.10.2025.

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.

Статьи принимаются на русском, белорусском и английском языках.

Подробные правила для авторов представлены на официальном сайте БарГУ (URL: https://publish.barsu.by/index.php/technik_science/index).

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.

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: https://publish.barsu.by/index.php/technik_science/index).

ДЛЯ ЗАМЕТОК