

«НАУКА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ РОССИИ»

SCIENCE IN THE CENTRAL RUSSIA»

12+

Периодическое печатное издание, журнал

Periodical printed edition, magazine

Включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в международную базу данных Agris № 2 (68), 2024 г.

Основан в 2012 г.
Выходит 6 раз в год

It is based in 2012.
There are 6 times a year

Учредитель и издатель журнала:

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов
в сельском хозяйстве» (ФГБНУ ВНИИТиН)*

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПЕЧАТНОГО ИЗДАНИЯ, ЖУРНАЛА
«НАУКА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ РОССИИ SCIENCE IN THE CENTRAL RUSSIA»

АФОНИЧЕВ Дмитрий Николаевич - заведующий кафедрой «Электротехники и автоматики» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», доктор технических наук, профессор

БАЛАБАНОВ Виктор Иванович – заведующий кафедрой «Организации и технологии гидромелиоративных и строительных работ» ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», доктор технических наук, профессор

ГОЛУБЕВ Иван Григорьевич – заведующий отделом научно-информационного обеспечения инновационного развития АПК ФГБНУ «Росинформагротех», доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Московской области

ЖАЛНИН Эдуард Викторович – заведующий отделом технологий и оборудования для зерновых, зернобобовых и масличных культур ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», доктор технических наук, профессор

ЗАВРАЖНОВ Анатолий Иванович – главный научный сотрудник ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», академик РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ

КАЗАКЕВИЧ Пётр Петрович – заместитель председателя президиума Национальной академии наук Республики Беларусь, член-корреспондент национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, иностранный член РАН

КАРТОШКИН Александр Петрович – профессор кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», доктор технических наук, профессор

КНЯЗЕВА Лариса Геннадьевна – главный научный сотрудник лаборатории хранения и защиты техники от коррозии ФГБНУ ВНИИТиН, доктор химических наук, доцент

КОВАЛЕВ Михаил Михайлович – научный руководитель ФГБНУ ВНИИМЛ, доктор технических наук, заслуженный изобретатель РСФСР, академик российской академии естественных наук, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники

КОРНЕВ АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ – заместитель главного редактора, ведущий научный сотрудник лаборатории использования моторного топлива с возложением обязанностей Ученого секретаря ФГБНУ ВНИИТиН, кандидат технических наук

КРАСНЯНСКИЙ Михаил Николаевич – ректор ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», профессор РАН, доктор технических наук, профессор

ЛАРЮШИН Николай Петрович – профессор кафедры «Механизация технологических процессов в АПК» ФГБОУ ВО «Пензенский ГАУ», доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заслуженный работник сельского хозяйства

ЛЮБАЧЕВСКИЙ Яков Петрович – академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук РАН, академик РАН, доктор технических наук, профессор, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники

МАНАЕНКОВ Константин Алексеевич – директор Инженерного института ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет, доктор технических наук, профессор

МАШКОВ Алексей Николаевич – главный редактор, заместитель директора по научной работе ФГБНУ ВНИИТиН, кандидат технических наук

ОРОБИНСКИЙ Владимир Иванович – декан агроинженерного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», доктор сельскохозяйственных наук, профессор

ОСТРИКОВ Валерий Васильевич – заместитель главного редактора, исполняющий обязанности директора ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук, профессор

САФОНОВ Валентин Владимирович – профессор кафедры «Техническое обеспечение АПК» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.В.Вавилова», доктор технических наук, профессор

ФЕДОРЕНКО Вячеслав Филиппович – заместитель директора ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ

BIANCO Vincenzo – Department of mechanical, energy, management and transportation engineering, University of Genoa, Italy, Ph.D., Associate Professor

VIGDOROVITSCH Michael – Geschäftsführer ANGARA GmbH, Düsseldorf, Deutschland, doktor fiziko-matematicheskikh nauk (Doktor der physikalischen und mathematischen Wissenschaften) Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences

© «Наука в центральной России Science in the central Russia», 2024

«НАУКА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ РОССИИ»

SCIENCE IN THE CENTRAL RUSSIA»

Периодическое печатное издание, журнал

Periodical printed edition, magazine

Включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в международную базу данных Agris № 2 (68), 2024 г.

Основан в 2012 г.
Выходит 6 раз в год

It is based in 2012.
There are 6 times a year

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПЕЧАТНОГО ИЗДАНИЯ, ЖУРНАЛА
«НАУКА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ РОССИИ SCIENCE IN THE CENTRAL RUSSIA»

4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

АНАШКИН Александр Витальевич – заведующий лабораторией управления качеством технологических процессов в сельском хозяйстве ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук
ВЕДИЩЕВ Сергей Михайлович – заведующий кафедрой «Агроинженерия» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», доктор технических наук, профессор
ДОРОВСКИХ Владимир Иванович – заведующий лабораторией управления качеством технологических процессов в животноводстве ФГБНУ ВНИИТиН, кандидат технических наук, доцент
ЕРОХИН Геннадий Николаевич – заведующий лабораторией использования зерноуборочной техники ФГБНУ ВНИИТиН, кандидат технических наук
НАГОРНОВ Станислав Александрович – главный научный сотрудник лаборатории использования моторного топлива ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук, профессор
ПЕТРАШЕВ Александр Иванович – заведующий лабораторией хранения и защиты техники от коррозии ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук
РЫКОВ Виктор Борисович – главный научный сотрудник отдела механизации растениеводства структурного подразделения «СКНИИМЭСХ» ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», доктор технических наук
ТИШАНИНОВ Николай Петрович – главный научный сотрудник лаборатории управления качеством технологических процессов в сельском хозяйстве ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук, профессор
УЛЮКИНА Елена Анатольевна - профессор кафедры материаловедения и технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», доктор технических наук, доцент
ХАКИМОВ Рамиль Тагирович – заведующий кафедрой «Автомобили, тракторы и технический сервис» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», доктор технических наук, доцент
ХОХЛОВ Алексей Леонидович – заведующий кафедрой «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина», доктор технических наук, профессор
ЧЕРНИКОВ Дмитрий Вячеславович – ведущий программист ФГБНУ ВНИИТиН
ШУВАЛОВ Анатолий Михайлович – главный научный сотрудник лаборатории использования топливно-энергетических ресурсов в стационарной энергетике сельского хозяйства ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук, профессор
ЩЕРБАКОВ Сергей Юрьевич – заведующий кафедрой «Технологические процессы и техносферная безопасность» ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», кандидат технических наук, доцент

Редакция

Журнал «Наука в центральной России Science in the central Russia»

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Главный редактор: Машков А.Н.; заместитель главного редактора: Корнев А.Ю.

№ 2 (68). Дата выхода в свет 27.04.2024. Тираж - 100 экз. Свободная цена. Подписной индекс: 25196.

Адрес редакции и издателя: 392022, Тамбовская обл., г. Тамбов, пер. Ново-Рубежный, д. 28, тел. 8(4752) 44-64-14; e-mail: viitn@mail.ru

Отпечатано в типографии «Студия печати Галины Золотовой». Адрес типографии: 392032, Тамбовская обл., г. Тамбов, ул. Кленовая, д. 24. e-mail: studiapechati@bk.ru.

Периодическое печатное издание, журнал «Наука в центральной России Science in the central Russia» зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77 - 66036 от 10.06.2016 г

© «Наука в центральной России Science in the central Russia», 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ, ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАШИН И
ОБОРУДОВАНИЯ

<i>Ожерельев В.Н., Никитин В.В., Савин В.Ю.</i> ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ОЧЕСАННОГО ЗЕРНОВОГО ВОРОХА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО СЕПАРАЦИИ НА РЕШЕТЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	7
<i>Выгузов М.Е., Ведищев С.М., Зайцев В.Ю., Коновалов В.В.</i> ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЛОПАСТНОГО ПОГРУЗЧИКА В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ СМЕСИТЕЛЕ.....	15
<i>Головин А.Д., Пожидаев И.А., Баскаков И.В., Орбинский В.И., Химченко А.В.</i> ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРА И ОБЪЁМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОЧАГА ОЗОНА В ЗЕРНОВОМ ВОРОХЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ ОЗОНИРОВАНИЯ.....	26
<i>Родионов Ю.В., Баглаев А.А., Свиридов А.А., Север А.В., Хохлов И.Г., Кубасов В.Г.</i> ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ.....	33
<i>Шувалов А.М., Машков А.Н., Тихомиров Д.А.</i> СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СХЕМ ПЛАВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ГАЗОГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА.....	47
<i>Шувалов А.М., Машков А.Н.</i> ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ВАРОЧНОГО КОТЛА С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ РАСХОДА ГАЗА.....	55

МЕТОДЫ, СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ МАШИН, ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

<i>Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Тишанинов К.Н., Емельянович С.В.</i> СТАБИЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА – УСЛОВИЕ ЕГО ОБЪЕКТИВНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	61
<i>Титов Н.В.</i> ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ВОССТАНОВЛЕННЫХ С ПОСЛЕДУЮЩИМ УПРОЧНЕНИЕМ КВДУ ЛЕМЕХОВ ОБОРОТНЫХ ПЛУГОВ	70
<i>Абрамов И.Л., Ковалев М.М., Перов Г.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЕННОГО СЛОЯ ДЛЯ УТОЧНЕННЫХ РАСЧЕТОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ НА ПРОЧНОСТЬ.....	77

ЦИФРОВЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ И РОБОТИЗИРОВАННЫЕ
ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

<i>Курьято Н.А., Князева Л.Г., Дорохов А.В., Брыксина В.А.</i> ПРОТИВОКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА МЕДИ МАСЛЯНЫМИ КОМПОЗИЦИЯМИ С КОМБИНИРОВАННОЙ ДОБАВКОЙ М-531.....	86
---	----

ФИЗИЧЕСКОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ,
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ, РОБОТИЗИРОВАННЫХ И БИОМАШИНЫХ СИСТЕМ

<i>Николюкин Д.А., Петерс В.Е., Попов М.А., Крищенко А.В.</i> ВЫБОР МОДЕЛИ И АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЕТЕКЦИИ КОРНЕПЛОДОВ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ.....	98
<i>Николюкин Д.А., Петерс В.Е., Попов М.А., Крищенко А.В.</i> ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОРНЕПЛОДОВ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ ПРИ СОРТИРОВКЕ ПЕРЕД УКЛАДКОЙ НА ХРАНЕНИЕ.....	106

Николюкин Д.А., Петерс В.Е., Попов М.А., Крищенко А.В.

РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ ЧАСТИ И 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРПУСА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОРНЕПЛОДОВ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ 113

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ, ДОЛГОВЕЧНОСТИ, ДИАГНОСТИКИ, ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА, ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ, РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Доворских Д.В., Глазков Ю.Е., Шубаев Н.А.

РЕМОНТ КОРЕННЫХ И ШАТУННЫХ ШЕЕК КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ДИСКРЕТНОГО УПРОЧНЕНИЯ 121

Михальченко А.М., Филлин Ю.И., Тюрева А.А.

РАССМОТРЕНИЕ УСТРОЙСТВ И СПОСОБОВ УПРОЧНЕНИЯ ГАЛТЕЛЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ППД, ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ 130

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ, МЕТАЛЛОВ, ТЕХНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ, ИЗДЕЛИЙ, МАШИН, ОБОРУДОВАНИЯ, ПОТОЧНЫХ ЛИНИЙ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

Баскаков И.В., Оробинский В.И., Химченко А.В., Чернышов А.В., Чернова О.В.

ВЛИЯНИЕ ОЗОНА НА КОРРОЗИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ 141

Ли Р.И., Коба М.Р., Тоиров И.Ж., Ерохин В.Е., Лисовый И.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУРБИНОЙ МЕШАЛКИ ДЛЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ 150

CONTENTS

METHODS, INSTRUMENTS FOR RESEARCH AND TESTING MACHINERY, EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

<i>Ozherelev V., Nikitin V., Savin V.</i> INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF COLLECTED GRAIN HEAP ON THE EFFICIENCY OF ITS SEPARATION ON A GRID SURFACE	7
<i>Vyguzov M., Vedishchev S., Zaitsev V., Kononov V.</i> THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE ROTATION FREQUENCY OF THE BLADE LOADER IN THE CIRCULATION MIXER	15
<i>Golovin A., Pozhidaev I., Baskakov I., Orobinsky V., Khimchenko A.</i> THEORETICAL PREREQUISITES FOR DETERMINING OF THE SIZE AND VOLUME OF OZONE DISTRIBUTION IN A GRAIN HEAP AND OPTIMIZATION OF OZONIZATION TIME....	26
<i>Rodionov Yu., Baglaev A., Sviridov A., Sever A., Khokhlov I., Kubasov V.</i> IMPROVING THE PERFORMANCE OF A DIESEL INTERNAL COMBUSTION ENGINE	33
<i>Shuvalov A., Mashkov A., Tikhomirov D.</i> COMPARATIVE EVALUATION OF SMOOTH POWER CONTROL SCHEME OF GAS BURNER DEVICE	47
<i>Shuvalov A., Mashkov A.</i> ECONOMIC EFFICIENCY OF THE ENERGY SUPPLY SYSTEM OF A COOKER WITH PROPORTIONAL GAS FLOW CONTROL.....	55
METHODS AND TOOLS FOR OPTIMIZING TECHNOLOGIES, PARAMETERS AND OPERATION MODES OF MACHINERY AND EQUIPMENT	
<i>Tishaninov N., Anashkin A., Tishaninov K., Emelyanovich S.</i> STABILIZATION OF THE PROCESS IS A CONDITION FOR ITS OBJECTIVE STUDY.....	61
<i>Titov N.</i> FEATURES OF WEAR OF PLOWS RESTORED WITH SUBSEQUENT STRENGTHENING OF CVAH REVOLVABLE PLOWS.....	70
<i>Abramov I., Kovalev M., Perov G.</i> MODELING THE MICRORELIEF OF THE SURFACE OF THE SOIL LAYER FOR REFINED CALCULATIONS OF WORKING BODIES FOR STRENGTH	77
DIGITAL INTELLIGENT TECHNOLOGIES, AUTOMATION AND ROBOTIC TECHNICAL TOOLS FOR THE AGRICULTURAL INDUSTRIAL COMPLEX	
<i>Knyazeva L., Kur'yato N., Dorokhov A., Bryksina V.</i> ANTI-CORROSION PROTECTION OF COPPER WITH OILS COMPOSITIONS CONTAINING ADDITIVE M-531	86
PHYSICAL, MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING OF MECHANIZED, AUTOMATED, ROBOTIC AND BIOMACHINE SYSTEMS	
<i>Nikolyukin D., Peters V., Popov M., Kryshchenko A.</i> CHOOSING A NEURAL NETWORK MODEL AND ARCHITECTURE FOR A TECHNICAL VISION SYSTEM FOR DETECTING SUGAR BEET ROOT CROPS	98
<i>Nikolyukin D., Peters V., Popov M., Kryshchenko A.</i> SOFTWARE AND ALGORITHMIC SUPPORT OF AN INTELLIGENT VISION SYSTEM FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF SUGAR BEET ROOT CROPS DURING SORTING BEFORE STORAGE	106

Nikolyukin D., Peters V., Popov M., Kryshchenko A.
HARDWARE DEVELOPMENT AND 3D MODELING OF THE BODY OF THE VISION SYSTEM FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF SUGAR BEET ROOT CROPS 113

METHODS AND TECHNICAL MEANS OF ENSURING RELIABILITY, DURABILITY, DIAGNOSTICS, TECHNICAL SERVICE, TECHNOLOGY OF STRENGTHENING, REPAIR AND RESTORATION OF MACHINERY AND EQUIPMENT

Dorovskikh D., Glazkov Yu., Shuvaev N.
REPAIR OF MAIN AND CONNECTING ROD JINS OF DIESEL ENGINE CRANKSHAFTS USING DISCRETE HARDENING 121

Mikhailchenkov A., Filin Yu., Tyureva A.
CONSIDERATION OF DEVICES AND METHODS FOR STRENGTHENING THE GALTELS OF BODIES OF ROTATION OF PPD, THEIR CLASSIFICATION AND DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS FOR IMPROVEMENT 130

METHODS FOR ASSESSING THE QUALITY OF MATERIALS, METALS, TECHNICAL FLUIDS, PRODUCTS, MACHINES, EQUIPMENT, PRODUCTION LINES IN THE AGRICULTURAL INDUSTRIAL COMPLEX

Baskakov I., Orobinsky V., Khimchenkov A., Chernyshnov A., Chernova O.
THE EFFECT OF OZONE ON THE CORROSIVE BEHAVIOR OF METALS AND ALLOYS 141

Li R., Kiba M., Toirov I., Erohin V., Lisovy I.
MODELING AND CALCULATION OF DESIGN AND OPERATING PARAMETERS TURBINE MIXER FOR SOLUTION DISPERSION POLYMER COMPOSITES 150

Тип статьи: научная
УДК 631.354.2
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-7-14

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ОЧЕСАННОГО ЗЕРНОВОГО ВОРОХА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО СЕПАРАЦИИ НА РЕШЕТЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Виктор Николаевич Ожерельев¹, **Никитин Виктор Васильевич**²,
Савин Владимир Юрьевич³

^{1,2} Брянский государственный аграрный университет, Брянск, Российская федерация
³ Калужский филиал Московского Государственного Технического Университета имени Н.Э. Баумана, Калуга, Российская федерация

¹vicoz@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>

²viktor.nike@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>

³savin.study@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2476-9768>

Автор, ответственный за переписку: Виктор Николаевич Ожерельев, vicoz@bk.ru
Corresponding author: Ozherelev Viktor, vicoz@bk.ru

Реферат. Исследовали сепарирующую способность решетчатой поверхности при работе с очесанным зерновым ворохом различного фракционного состава. Научная гипотеза исследования заключается в предположении о том, что при увеличении в ворохе массовой доли половы эффективность сепарации должна уменьшаться, из-за увеличения объема зерна при неизменной массе навески исследуемого вороха по мере уменьшения содержания зерна в связи большей объемной массой последнего по сравнению с половиной. Правомерно предположение о том, что прохождение сквозь отверстия решетчатой поверхности большего объема вороха требует большего времени, то есть скорость сепарации должна уменьшаться. Экспериментальные исследования были выполнены на очесанном зерновом ворохе пшеницы сорта Московская 56 с относительной влажностью 12 %. Массовая доля зерна в ворохе варьировалась от 100 до 60% с шагом в 10%. Экспериментальная установка была выполнена на базе колосового элеватора зерноуборочного комбайна КЗС 1218, у которой вместо демонтированной нижней стенки установлена решетчатая поверхность с продольными отверстиями длиной 900 мм и шириной 12 мм. Установка имитировала работу наклонной камеры зерноуборочного комбайна, решетчатое днище которой должно выделять из очесанного вороха свободное зерно и направлять его на очистку, минуя молотильный аппарат. В связи с этим скорость движения скребкового транспортера составляла 3 м/с. Прошедший сквозь отверстия решетки ворох улавливался, после чего осуществлялись его разборка на фракции и учет. В результате эксперимента установлено, что по мере уменьшения в ворохе массовой доли зерна скорость сепарации последнего в пределах зоны варьирования исходного параметра уменьшается на 4%. Следовательно, целесообразно предварительное удаление из очесанного вороха значительной доли легких примесей до его поступления в наклонную камеру.

Ключевые слова: очес зерна, сепарация очесанного вороха, наклонная камера, решетчатая поверхность.

INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF COLLECTED GRAIN HEAP ON THE EFFICIENCY OF ITS SEPARATION ON A GRID SURFACE

Viktor Ozherelev¹, **Viktor Nikitin**², **Vladimir Savin**³

^{1,2} Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russian Federation

³ Kaluga branch of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Kaluga, Russian Federation

¹vicoz@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>

²viktor.nike@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>

³savin.study@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2476-9768>

Abstract. *The separating ability of the lattice surface when working with combed grain heaps of various fractional compositions was studied. The scientific hypothesis of the study is the assumption that with an increase in the mass fraction of chaff in the heap, the separation efficiency should decrease due to an increase in the volume of grain with a constant mass of the sample of the heap under study as the grain content decreases due to the larger volumetric mass of the latter compared to the chaff. It is a legitimate assumption that the passage of a larger volume of heap through the holes of the lattice surface requires more time, that is, the separation rate should decrease. Experimental studies were carried out on a combed grain heap of wheat variety Moskovskaya 56 with a relative humidity of 12%. The mass fraction of grain in the heap varied from 100 to 60% in increments of 10%. The experimental installation was made on the basis of the grain elevator of the KZS 1218 combine harvester, in which, instead of the dismantled lower wall, a lattice surface with longitudinal holes 900 mm long and 12 mm wide was installed. The installation simulated the operation of the inclined chamber of a combine harvester, the lattice bottom of which should separate free grain from the combed heap and direct it for cleaning, bypassing the threshing apparatus. In this regard, the speed of the scraper conveyor was 3 m/s. The heap that passed through the holes in the lattice was caught, after which it was disassembled into fractions and accounted for. As a result of the experiment, it was established that as the mass fraction of grain in the heap decreases, the separation rate of the latter within the zone of variation of the initial parameter decreases by 4%. Therefore, it is advisable to first remove a significant portion of light impurities from the combed heap before it enters the inclined chamber.*

Keywords: *combing grain, separation of combed heap, feeder chamber, lattice surface.*

Для цитирования: Ожерельев В.Н., Никитин В.В., Савин В.Ю. Влияние состава очесанного зернового вороха на эффективность его сепарации на решетчатой поверхности // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 7-14. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-7-14>.

For citation: Ozherelev V., Nikitin V., Savin V. The influence of the composition of a combed grain heap on the efficiency of its separation on a lattice surface. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 68(2): 7-14. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-7-14>.

Введение. Исследования отечественных ученых свидетельствуют о том, что уборка зерна методом его очеса на корню содержит потенциал к уменьшению энергоемкости уборочного процесса в 1,4 - 2 раза по сравнению с использованием традиционного зерноуборочного комбайна [1-4]. Внедрение энергосберегающего способа уборки в производство сдерживается вследствие того, что серийные зерноуборочные комбайны не приспособлены к работе с очесанным зерновым ворохом [5]. Дело в том, что в нем может содержаться до 80% свободного зерна, которое поступает в молотильный аппарат без наличия в этом технологической необходимости. В результате на привод барабана расходуется дополнительно не менее 10 кВт мощности, а доля дробленого зерна в бункере может достигать 5% [6].

Очевидно, что для оптимизации технологического процесса целесообразно выделить из потока очесанного вороха свободное зерно и направить его в систему очистки комбайна минуя молотильный аппарат. В частности, это можно осуществить непосредственно в наклонной камере жатки комбайна, снабдив ее решетчатым днищем 3 (рисунок 1) [7, 8]. Из перемещаемого скребками транспортера 2 очесанного вороха на отверстиях решетчатого днища 3 выделяется проходом свободное зерно 5 (с сопутствующими мелкими примесями) которое дополнительным транспортирующим органом 4 подается непосредственно на транспортную доску 6 системы очистки комбайна. В результате в молотильное устройство должны поступать, в основном, недомоленные колосья, куски соломин и лишь небольшая часть свободного зерна.

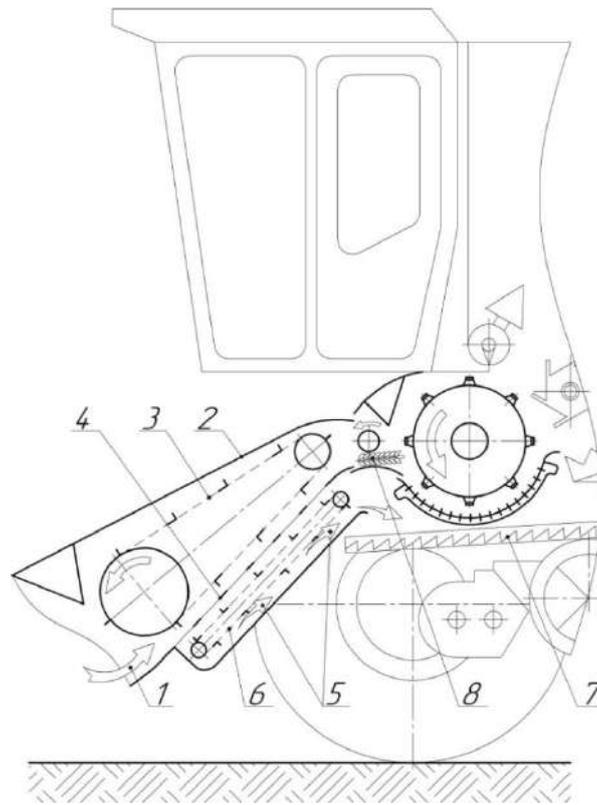


Рисунок 1 - Общий вид зерноуборочного комбайна с модернизированной наклонной камерой:
1 – наклонная камера; 2 – плавающий транспортер; 3 – решетчатое днище;
4 – дополнительный скребковый транспортер; 5 – свободное зерно; 6 – транспортная доска

Результаты проведенных экспериментальных исследований в целом подтверждают указанную гипотезу. Как правило, при длине решетчатой части днища 920 мм удается выделить более 80% свободного зерна. Экстраполяция результата экспериментов в сторону потенциальной возможности удлинения решетчатой части днища наклонной камеры показывает, что, в принципе, в серийных зерноуборочных комбайнах можно добиться почти полного выделения свободного зерна до его поступления в молотильное устройство [9].

Более глубокий анализ результатов экспериментов позволил выявить не до конца реализованные возможности улучшения эффективности сепарации очесанного зернового вороха в наклонной камере. Дело в том, что, как правило, эксперименты проводили при стабильном фракционном составе вороха. При этом имело место наличие в нем (по массе) до 20% легких примесей. С учетом различия в объемной массе зерна и половины реальный объем компонентов вороха имеет совершенно иные пропорции. То есть, при незначительном увеличении массовой доли легких примесей непропорционально увеличивается их объем, что может отрицательно отразиться на эффективности процесса сепарации, если принять в качестве рабочей гипотезы наличие зависимости скорости сепарации от объема вороха.

Цель исследований. Если базироваться на принятой выше гипотезе исследования, заключающейся в том, что увеличение в очесанном зерновом ворохе массовой доли половины непропорционально увеличивает объем предполагаемого прохода и уменьшает скорость сепарации, то было бы целесообразно предварительно удалить значительную часть легких примесей до их поступления в наклонную камеру. В связи с этим целью исследований является установление реальной зависимости скорости сепарации свободного зерна от его содержания в очесанном ворохе. В результате этого можно оценить актуальность изменения конструкции

очесывающего адаптера, обеспечивающего предварительное удаление из вороха до его поступления в наклонную камеру значительной части легких примесей.

Материалы и методы. Для проведения эксперимента на базе колосового элеватора комбайна КЗС-1218 была разработана экспериментальная установка (рисунок 2). Нижняя стенка корпуса 1 элеватора была демонтирована, а вместо нее установлена решетчатая поверхность 3 длиной 920 мм, в которой выполнены продольные отверстия длиной 900 мм и шириной 12 мм. Неизменным сохранен скребковый транспортер 2, привод которого осуществлялся посредством электродвигателя 6 и цепной передачи 7. Частотный преобразователь 8 («Веспер» E2-8300) позволяет бесступенчато изменять скорость движения скребкового транспортера 2. Кроме того, система крепления элеватора позволяет изменять угол его наклона от 0 до 45°.

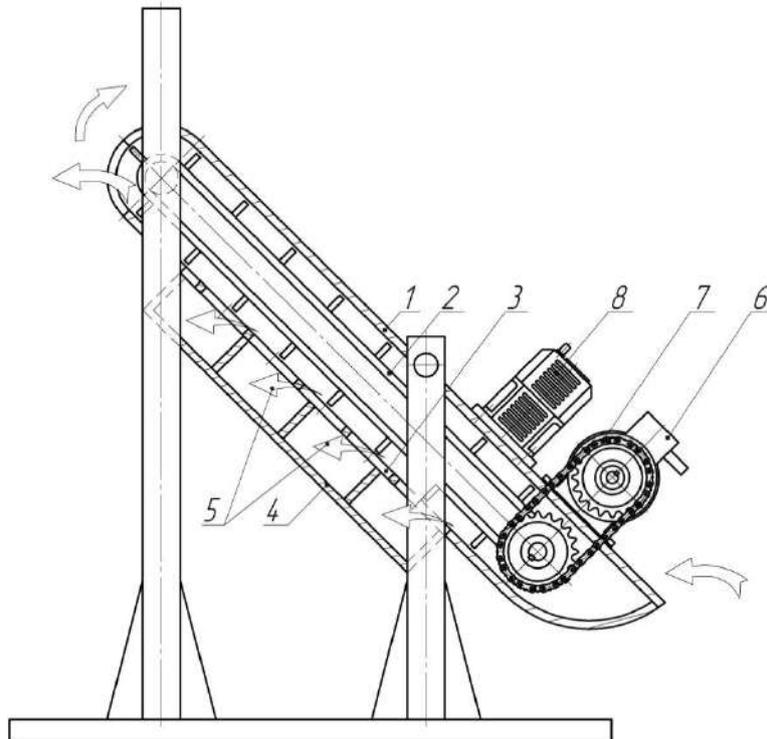


Рисунок 2 - Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – корпус колосового элеватора; 2 – транспортер скребковый; 3 – решетка; 4 – емкость;
5 – проход вороха; 6 – электродвигатель; 7 – передача цепная; 8 - частотный преобразователь
«Веспер» E2-8300

Эксперимент был спланирован как однофакторный, с варьированием доли свободного зерна в подаваемом ворохе от 100% до 60% с шагом варьирования в 10%. При этом масса навески сохранялась неизменной и составляла 1 кг. При переходе на очередное значение факторного признака соответствующая масса зерна удалялась из навески и заменялась легкими примесями такой же массы. При этом при неизменной массе навески ее объем увеличивался. Эксперимент выполняли на пшенице сорта Московская 56 влажностью 12%.

Эксперимент проводили следующим образом. Устанавливали корпус 1 элеватора в горизонтальное положение и включали электродвигатель 6, доводя с помощью частотного преобразователя 8 частоту его вращения до величины, обеспечивающей линейную скорость скребкового транспортера 2 соответствующей скорости скребков плавающего транспортера наклонной камеры комбайна (3 м/с). После этого в течение 1 секунды навеска вороха подавалась на вход скребкового транспортера 2. Полученный в результате сепарации проход 5 вороха, включавший свободное зерно и сопутствующие ему мелкие сопоставимого размера, накапливался в размещенной под решетчатой поверхностью 3 емкости 4. После остановки

электродвигателя 6 емкость 4 снимали, разбирали ворох 5 по фракциям и определяли массовую долю свободного зерна, прошедшего сквозь отверстия решетчатой поверхности 3. Эксперимент был выполнен в пятикратной повторности.

Результат и его обсуждение. Результаты эксперимента приведены на рисунок 3. Они свидетельствуют о том, что имеет место линейная зависимость между массовой долей в ворохе свободного зерна и его проходом сквозь отверстия решетчатой поверхности (рис. 3а). Величина коэффициента детерминации ($R^2 = 0,996$) свидетельствует о высокой степени адекватности линейной зависимости между величиной прохода сквозь отверстия решетчатой поверхности свободного зерна и его массовой долей в ворохе

$$П_{з\text{ер}} = 0,101 \cdot C_{з\text{ер}} + 70,479 \quad (1),$$

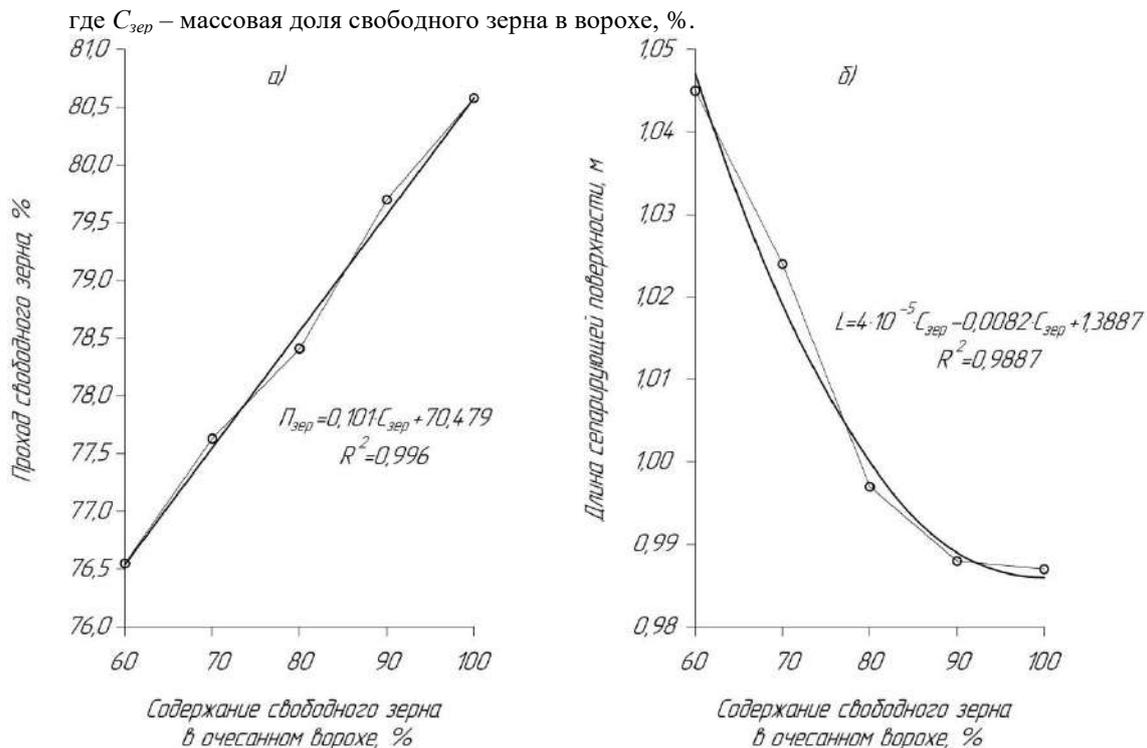


Рисунок 3 - Результаты эксперимента:

- а) зависимость прохода свободного зерна от его массовой доли в ворохе; б) экстраполяция длины решетчатой поверхности, необходимой для полного прохода свободного зерна

Уменьшение в ворохе массовой доли свободного зерна до 60% снижает его проход сквозь отверстия решетчатой поверхности на 4%. Экстраполяция полученной зависимости позволила установить, что для того, чтобы обеспечить полный проход свободного зерна сквозь отверстия решетчатой поверхности, в зависимости от массовой доли в ворохе свободного зерна, ее длина должна варьироваться в пределах от 0,98 м до 1,05 м (рис. 3б). При этом с высокой степенью достоверности ($R^2 = 0,9887$) между длиной решетчатой поверхности и массовой долей свободного зерна подчиняется полиномиальной зависимости второго порядка

$$L = 4 \cdot 10^{-5} \cdot C_{з\text{ер}}^2 - 0,0082 \cdot C_{з\text{ер}} + 1,3887. \quad (2)$$

То есть, как и было установлено ранее, длина решетчатой поверхности близка к длине днища наклонной камеры серийного зерноуборочного комбайна. Тем не менее, предварительное удаление части легких примесей до поступления вороха в наклонную камеру имеет смысл.

Для осуществления этого процесса предложено несколько вариантов конструктивных решений. Они основаны на инерционном способе разделения в воздушном потоке компонентов с разной парусностью. В частности, (рисунок 4) предполагается, что разделение свободного зерна и

половы можно осуществить посредством жалюзи 10, смонтированных на задней стенке 9 корпуса 5 очесывающего адаптера. Движущийся сверху вниз (по направлению стрелки 18) воздушный поток, содержащий легкую полову и более тяжелое свободное зерно резко изменяет направление движения, проходя между пластинами жалюзи 10. В результате обладающая высокой парусностью полова и другие легкие примеси 19 удаляются из корпуса 5 адаптера вместе с воздухом, а более инерционные свободные зерна и недомолоченные колосья 20 выпадают из воздушного потока на днище корпуса 5 адаптера с которого посредством шнека 3 поступают к транспортеру 4 наклонной камеры.

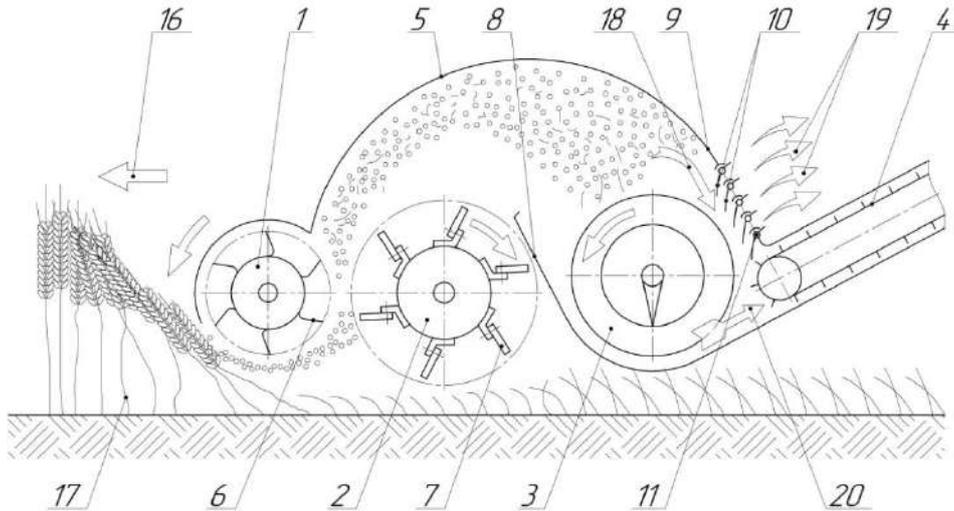


Рисунок 4 - Принципиальная схема удаления полова из корпуса очесывающего адаптера (Пат № 2566017 РФ)

Второй вариант конструктивного решения основан на резком изменении поперечного сечения воздушного потока, генерируемого очесывающим барабаном 2 (рисунок 5).

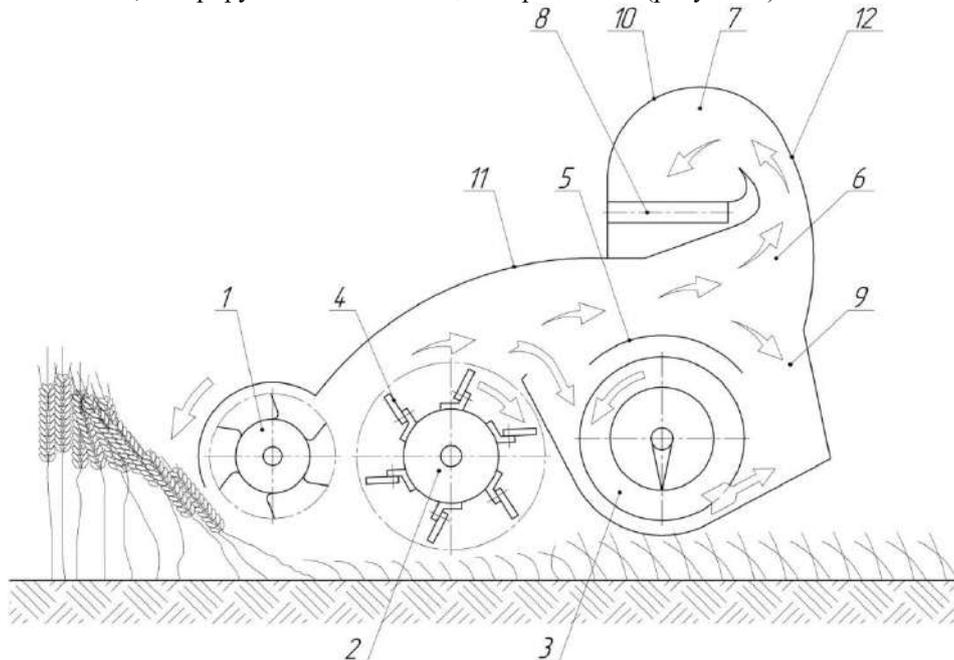


Рисунок 5 - Очесывающий адаптер с разделением компонентов за счет изменения скорости воздушного потока

Посредством швыркового эффекта и под воздействием воздушного потока, создаваемого очесывающим барабаном 2, очесанная масса перемещается и разделяется. Свободное зерно, как менее парусный и более тяжелый компонент, осаживается на шнек 3, а легкие примеси, обладающие более высокой парусностью, уносятся воздушным потоком по воздушному каналу 6 в осадочную камеру 7. Зерно, попавшее между направляющим щитком 5 и верхней стенкой корпуса 11, теряет скорость в районе продольного окна 9 вследствие увеличения поперечного сечения канала и так же осаживается на шнек 3. Из осадочной камеры 7 более легкие и обладающие высокой парусностью частицы вороха выводятся транспортером 8 и выбрасываются сбоку очесывающего устройства.

Принципиальная работоспособность последнего технического решения подтверждена в результате испытания масштабной модели предлагаемого устройства.

Выводы.

1. Эффективность сепарации очесанного зернового вороха на решетчатой поверхности зависит от массовой доли в нем свободного зерна. При уменьшении ее со 100% до 60% интенсивность сепарации уменьшается на 4%. Следовательно, предварительное удаление из очесанного зернового вороха легких примесей является актуальной задачей.

2. Существуют технические решения, обеспечивающие предварительное выделение из очесанного зернового вороха наиболее легких компонентов с высокой парусностью до его поступления в наклонную камеру комбайна.

Список источников

1. Червяков И.В. Совершенствование процесса уборки зерновых культур комбайновым очесом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2020. 22 с.

2. Lovchikov A.P., Ognev I.I. Theoretical background for the development of stationary process of grain mass threshing with a combine harvester. E3S Web of Conferences. Sevastopol, 2020. p. 01004. (In Eng.). doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019301004>.

3. Konstantinov M., Glushkov I., Mukhamedov V., Lovchikov A. Increase in soil moisture reserves due to the formation of high stubble residues for the accumulation of snow precipitation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vladivostok, 2021. p. 052049. (In Eng.). doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/5/052049>.

4. Пустыгин М.А. Теория и технологический расчет молотильных устройств. М.: ОГИЗ-СЕЛЬХРЗГИЗ, 1948. 96 с.

5. Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Результаты адаптации конструкции комбайна к работе с очесывающей жаткой // Инженерные технологии и системы. 2022, Т. 32, №2. С. 190-206.

6. Никитин В.В. Совершенствование технологической схемы зерноуборочного комбайна и параметров его рабочих органов: дис. ... докт. техн. наук. Брянск, 2021. 350 с.

7. Наклонная камера зерноуборочного комбайна: А. С. 1687078 СССР / Дементьев А.В., Скорик В.И., Пастухов Б.К., Садыков Ж.С., Андрусенко Б.И. № 4689013/15; заявл. 12.05.1989; опубл. 30.10.1991, Бюл. № 40. 5с.

8. Зерноуборочный комбайн: патент 2680666 Российская Федерация / Шабанов Н.П., Хабрат Н.И., Умеров Э.Д. № 2016149302; заявл. 14.12.2016; опубл. 25.02.2019, Бюл. № 8. 4 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41019193>.

9. Ozherelyev V.N., Nikitin V.V., Komogortsev V.F. Comparison of different methods for preliminary separation of free grain when hatching standing plants // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference (FarEastCon 2020). 2021. Vol. 1079. Chapter 5. p. 062088. (In Eng.). doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/6/062088>.

References

1. Chervyakov I.V. Improving the process of harvesting grain crops using combine tow: abstract of thesis. dis. ...cand. tech. Sci. Rostov-on-Don, 2020. 22 p.

2. Lovchikov A.P., Ognev I.I. Theoretical background for the development of stationary process of grain mass threshing with a combine harvester. E3S Web of Conferences. Sevastopol, 2020. p. 01004. (In Eng.). doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019301004>.

3. Konstantinov M., Glushkov I., Mukhamedov V., Lovchikov A. Increase in soil moisture reserves due to the formation of high stubble residues for the accumulation of snow precipitation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vladivostok, 2021. p. 052049. (In Eng.). doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/5/052049>.
4. Pustygin M.A. Theory and technological calculation of threshing devices. M.: OGIZ-SELKHRZGIZ, 1948. 96 p.
5. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Results of adapting the combine design to work with a stripper header // Engineering technologies and systems. 2022, T. 32, No. 2. pp. 190-206.
6. Nikitin V.V. Improving the technological scheme of a grain harvester and the parameters of its working parts: dis. ... doc. tech. Sci. Bryansk, 2021. 350 p.
7. Inclined chamber of a combine harvester: A. S. 1687078 USSR / Demytyev A.V., Skorik V.I., Pastukhov B.K., Sadykov Zh.S., Andrusenko B.I. No. 4689013/15; application 05/12/1989; publ. 10/30/1991, Bulletin. No. 40. 5s.
8. Combine harvester: patent 2680666 Russian Federation / Shabanov N.P., Khabrat N.I., Umerov E.D. No. 2016149302; application 12/14/2016; publ. 02/25/2019, Bulletin. No. 8. 4 pp. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41019193>.
9. Ozherelyev V.N., Nikitin V.V., Komogortsev V.F. Comparison of different methods for preliminary separation of free grain when hatcheling standing plants // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference (FarEastCon 2020). 2021. Vol. 1079. Chapter 5. p. 062088. (In Eng.). doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/6/062088>.

Информация об авторах

В.Н. Ожерельев – доктор с.-х. наук, профессор; В.В. Никитин – д.т.н., доцент; В.Ю. Савин – к.т.н., доцент.

Information about the authors

V. Ozherelyev – Doctor of Agricultural Sciences, professor; V. Nikitin – doctor of technical sciences; V. Savin – candidate of technical sciences.

Вклад авторов: В.Н. Ожерельев – написание текста статьи; В.В. Никитин – организация и выполнение эксперимента; В.Ю. Савин – обработка результатов, участие в оформлении статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: V. Ozherelyev – writing the text of the article; V. Nikitin – organization and execution of the experiment; V. Savin – processing of results, participation in the preparation of the article.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 13.03.2024 Принята к публикации (Accepted): 23.04.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.363
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-15-25

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЛОПАСТНОГО ПОГРУЗЧИКА В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ СМЕСИТЕЛЕ

Максим Евгеньевич Выгузов¹, Сергей Михайлович Ведищев²,
Владимир Юрьевич Зайцев³, Владимир Викторович Коновалов⁴

^{1,2} Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация

¹ maks_vyguzov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2925-3111>

² serg666_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3759-9809>

^{3,4} Пензенский государственный технологический университет,
г. Пенза, Российская Федерация

³ vluzai@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6230-0856>

⁴ konovalov-penza@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5011-5354>

Автор ответственный за переписку: Максим Евгеньевич Выгузов, maks_vyguzov@mail.ru
Corresponding author: Maxim Vyguzov, maks_vyguzov@mail.ru

Реферат. Целью исследований является обоснование критической частоты вращения рабочего органа на основе силового анализа и моделирования движения частиц сыпучего продукта в горизонтальном погрузчике с радиальными лопастями, расположенном в циркуляционном смесителе. Методика исследований предусматривала обоснование максимальной частоты вращения рабочего органа погрузчика на основе анализа действующих на частицы сил в процессе их перемещения лопастями погрузчика и попадания в лоток в процессе полета. На основе полученных выражений осуществлялось моделирование значений показателей для проведения анализа и обоснования рациональных величин. Реализация численного анализа полученных выражений на основе силового анализа и моделирования процесса математическим пакетом Mathcad позволила выявить критические значения частоты вращения рабочего органа лопастного погрузчика исходя из условия возможности схода материала с лопасти и условия возможности полета частиц с лопасти в приемный лоток. В силу потребности схода материала с лопастей и коэффициента снижения частоты вращения равного 0,9, частота вращения лопастного погрузчика наружным диаметром лопастей 0,24 м и внутренним - 0,17 м, не должна превышать 77 мин⁻¹. Наибольшая частота вращения вала рабочего органа, при которой частицы материала будут попадать в зону приемного лотка с наружного конца лопасти – 43 мин⁻¹, а с внутреннего – 73 мин⁻¹. В процессе изготовления циркуляционного смесителя с лопастным погрузчиком с радиальными лопастями для проведения экспериментальных исследований следует обеспечить возможность изменения частоты вращения до 43 мин⁻¹. Для проверки теоретических положений в поисковых опытах требуется предусмотреть возможность изменения частоты вращения вала лопастного погрузчика до 70 мин⁻¹.

Ключевые слова: циркуляционный смеситель, силовой анализ, горизонтальный лопастной погрузчик с радиальными лопастями, критическая частота вращения, численное моделирование.

THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE ROTATION FREQUENCY OF THE BLADE LOADER IN THE CIRCULATION MIXER

Maxim Vyguzov¹, Sergey Vedishchev², Vladimir Zaitsev³, Vladimir Kononov⁴

^{1,2} Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

¹ maks_vyguzov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2925-3111>

² serg666_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3759-9809>

^{2,3} Penza State Technological University, Penza, Russian Federation

³ vluzai@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6230-0856>

⁴konovalov-penza@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5011-5354>

Abstract. The purpose of the research is to substantiate the critical rotation speed of the working body based on force analysis and modeling of the movement of particles of a bulk product in a horizontal loader with radial blades located in a circulation mixer. The research methodology involved substantiating the maximum rotation speed of the loader working body based on an analysis of the forces acting on particles as they move by the loader blades and fall into the tray during flight. Based on the obtained expressions, the values of the indicators were modeled to analyze and substantiate rational values. The implementation of a numerical analysis of the obtained expressions based on force analysis and process modeling with the Mathcad mathematical package made it possible to identify the critical values of the rotation speed of the working body of a paddle loader based on the condition for the possibility of material coming off the blade and the condition for the possibility of particles flying from the blade into the receiving tray. Due to the need for material to flow off the blades and the rotation speed reduction factor of 0.9, the rotation speed of a blade loader with an outer diameter of blades of 0.24 m and an inner diameter of 0.17 m should not exceed 77 min⁻¹. The highest rotation speed of the working body shaft at which particles of material will enter the receiving tray area from the outer end of the blade is 43 min⁻¹, and from the inner end - 73 min⁻¹. In the process of manufacturing a circulating mixer with a radial blade loader for experimental studies, it should be possible to change the rotation speed up to 43 min⁻¹. To test theoretical principles in exploratory experiments, it is necessary to provide for the possibility of changing the rotation speed of the blade loader shaft to 70 min⁻¹.

Keywords: circulating mixer, force analysis, horizontal radial blade loader, critical speed, numerical simulation.

Для цитирования: Выгузов М.Е., Ведищев С.М., Зайцев В.Ю., Коновалов В.В. Теоритическое обоснование частоты вращения лопастного погрузчика в циркуляционном смесителе // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 15-25. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-15-25>.

For citation: Vyguzov M., Vedishchev S., Zaitsev V., Konvalov V. Theoretical justification of the rotation frequency of the blade loader in the circulation mixer. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 68(2): 15-25. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-15-25>.

Введение. Производство животноводческой продукции требует обеспечения животных качественными кормами, что требует применения смесителя для приготовления комбикормов. Для приготовления смесей сухих концентрированных кормов используются различные типы смесителей [1-4]: гравитационные [5,6], с пневматическим [7] и механическим действием: вибрационные [8-10], шнеково-ленточные [11-13], лопастные [14-16], с комбинированным рабочим органом [17-19], с вертикальной [14,15] и горизонтальной [12,19] осью вращения рабочего органа, быстроходные [14,15] и тихоходные [11-13], по принципу действия как непрерывного [5,10,19], так и периодического действия [12,13]. В настоящее время наибольшее распространения получили смесители периодического действия, порции компонентов, закладываемые в которые взвешиваются на весах. [20-23]. В ряде случаев кроме смешивания, конструкция смесителя позволяет осуществлять дозирование, измельчение компонентов и т.п. [17,24,25]. Для обоснования конструктивных параметров широко применяются теоретические исследования и моделирование движения материала в рабочих органах [26,27].

В случае применения циркуляционного смесителя [28] для перегрузки материала с одного рабочего органа на другой предлагается использовать лопастной погрузчик материала между рабочими органами внутри смесителя.

Целью исследований является обоснование критической частоты вращения рабочего органа на основе силового анализа и моделирования движения частиц сыпучего продукта в горизонтальном погрузчике с радиальными лопастями, расположенном в циркуляционном смесителе.

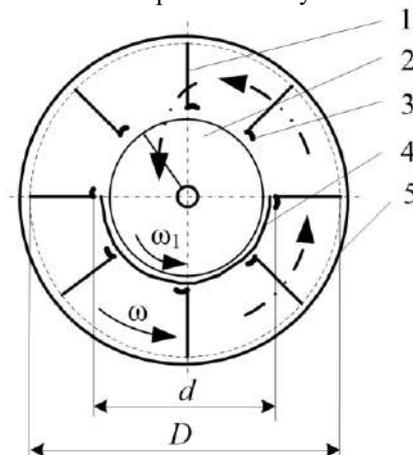
Материал и методы. Методика исследований предусматривала обоснование максимальной частоты вращения рабочего органа погрузчика на основе анализа действующих на частицы сил в процессе их перемещения лопастями погрузчика и попадания в лоток в процессе полета. На

основе полученных выражений осуществлялось моделирование значений показателей для проведения анализа и обоснования рациональных величин.

Для реализации цели сформулированы задачи: 1) на основе силового анализа получить выражения, описывающие действующие ускорения на частицу, условия схода частиц с лопасти, полета частиц в лоток; 2) численный анализ значений показателей на основе моделирования процесса математическим пакетом Mathcad; 3) обоснование критических значений частоты вращения рабочего органа.

Результаты и их обсуждение. Для согласованной работы подающего и отводящего шнеков и расположенного между ними лопастного подъемника, требуется теоретическое рассмотрение работы лопастного подъемника и обоснование критических значений его частоты вращения. Следует учитывать ряд условий: возможность схода материала с лопасти и наличие возможности полета частиц с лопасти в приемный лоток.

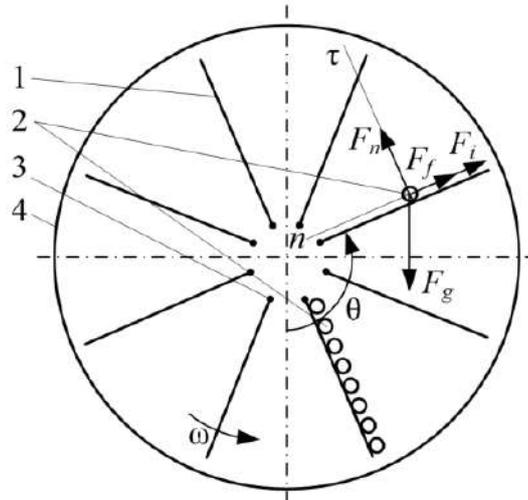
Изначально материал перемещается ленточным рабочим органом циркуляционного смесителя (на рисунке 1 не показан) шнекового типа вдоль внутренних стенок наружного кожуха 5. При поступлении материала смеси в полость между радиальными лопастями 1 и ограниченную снаружи кожухом 5, а изнутри сетчатой поверхностью вала 3 ленточного рабочего органа (соответствует внутреннему радиусу краев лопастей 1), корм радиальными лопастями 1 погрузчика поднимается, а затем ссыпается по поднятым лопастям через сквозные отверстия поверхности вала 3 на неподвижный лоток 4. При вращении винта отгрузочного шнека 2 материал из лотка 4 сталкивается вдоль оси вращения внутри вращающегося кожуха 3 отгрузочного шнека 2, одновременно являющегося валом ленточного рабочего органа. Форма и размеры отверстий поверхности вала 3 выбираются таким образом, чтобы не препятствовать сходу материала с лопасти свободному прохождению сыпавшего материала к лотку.



1 – лопасти погрузчика; 2 – отгрузочный шнек; 3 – вал ленточного рабочего органа (он же кожух отгрузочного шнека, в зоне радиальных лопастей имеющий сквозные продольные прорезы между лопастями, а в промежутках прорезей к данному валу крепятся лопасти); 4 – приемный лоток;
 5 – наружный кожух лопастного ротора

Рисунок 1 - Схема поперечного сечения горизонтального лопастного погрузчика с радиальными лопастями

Рассмотрим частицу материала, лежащую на лопасти, проведем оси подвижной системы координат Mt и изобразим, действующие на нее силы при вращении лопастей погрузчика (рисунок 2). На частицу материала действуют следующие силы: сила тяжести $F_g = m \cdot g$, где g – ускорение свободного падения; нормальная реакция лопасти F_n ; сила трения $F_f = f \cdot F_n$, где f – коэффициент трения между материалом и лопастью; центробежная сила инерции $F_i = m \cdot \omega^2 \cdot R$, где m – масса частицы, R – расстояние частицы от оси вращения вала ленточного рабочего органа, ω – угловая скорость вала ленточного рабочего органа.



1 – лопасти погрузчика; 2 – частица материала; 3 – вал ленточного рабочего органа (кожух отгрузочного шнека); 4 – наружный кожух лопастного ротора

Рисунок 2 - Расчетная схема горизонтального лопастного погрузчика с радиальными лопастями

На основе схемы сил, составим уравнения кинестатики в проекциях на оси подвижной системы координат $M\tau n$:

$$\sum n_i = 0, -F_g \cdot \cos(\theta) - F_f - F_i = 0, \quad (1)$$

$$\sum \tau_i = 0, F_n - F_g \cdot \sin(\theta) = 0. \quad (2)$$

Из уравнения (2):

$$F_n = F_g \cdot \sin(\theta) = m \cdot g \cdot \sin(\theta). \quad (3)$$

Таким образом, уравнение (1) с учетом выражения (3) и выражений $F_i = m \cdot \omega^2 \cdot R$, $F_g = m \cdot g$, $F_f = f \cdot F_n$ примет вид:

$$-m \cdot g \cdot \cos(\theta) - f \cdot m \cdot g \cdot \sin(\theta) - m \cdot R \cdot \omega^2 = 0. \quad (4)$$

При значительной величине центробежных сил, они будут уравновешивать силу тяжести, и тем самым не произойдет сход материала по лопасти в сторону приемного лотка.

Из уравнения (4) определим значения частот вращения вала ленточного рабочего органа, при которых сход материала с лопасти невозможен при положении лопасти в верхнем вертикальном положении (угол $\theta = 180^\circ$):

$$-m \cdot g - m \cdot R \cdot \omega^2 = 0. \quad (5)$$

Откуда:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{R}} \quad \text{или} \quad n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} \quad (6)$$

Из уравнения (6) найдем значение частоты вращения вала ленточного рабочего органа, для различных вариантов расположения частиц материала на лопасти ($R = 0,085 \dots 0,12$ м). Значения частот вращения вала ленточного рабочего органа, при которых сход материала с лопасти невозможен по результатам численного моделирования приведены на рисунке 3. С уменьшением радиуса расположения частиц, критическая частота вращения возрастает.

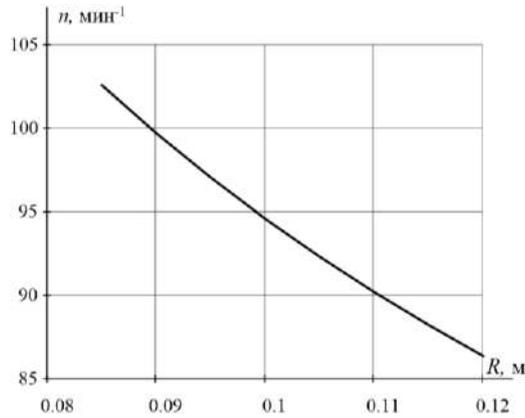


Рисунок 3 - Значения частот вращения вала, при которых сход материала с лопасти невозможен, для различного положения частиц на лопасти

Теперь из уравнения (4) найдем критический угол подъема частицы материала, при превышении которого начинается движение частицы по лопасти вниз:

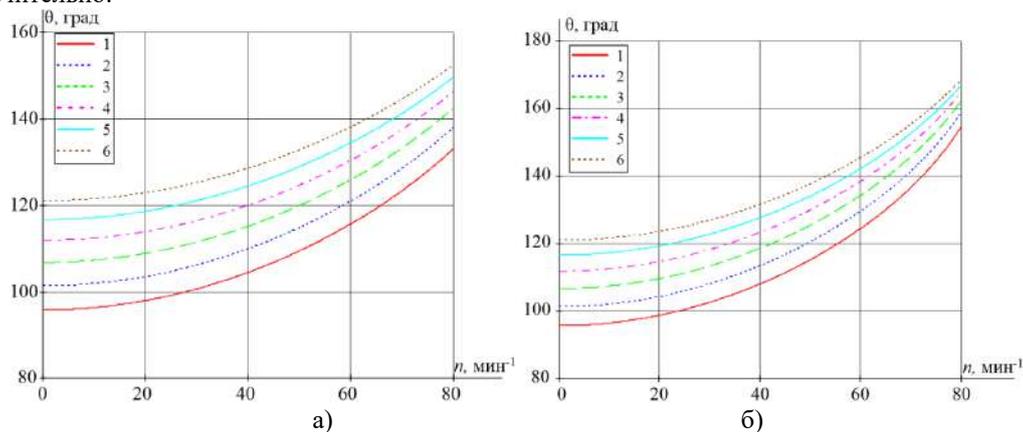
$$\theta = 2 \arctg \left(\frac{\sqrt{f^2 \cdot g^2 - R^2 \cdot \omega^4 + g^2} + f \cdot g}{g - R \cdot \omega^2} \right). \quad (7)$$

Значения критического угла подъема частицы материала в зависимости от частоты вращения вала рабочего органа и коэффициента трения по результатам численного моделирования приведены на рисунке 4. Увеличение трения способствует большему поднятию материала. Увеличение радиуса также способствует росту угла поднятия из-за роста центробежных сил, прижимающих материал к лопасти.

Из уравнения (4) выразим зависимость критической частоты вращения вала рабочего органа в зависимости от критического угла подъема частицы на лопасти, коэффициента трения и положения частицы на лопасти:

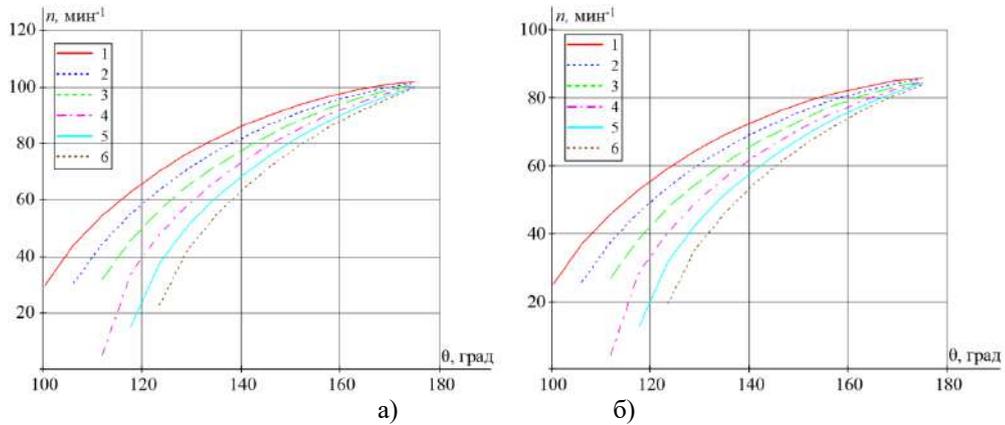
$$n = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{-g \cdot \cos \theta - f \cdot g \cdot \sin \theta}{R}}. \quad (8)$$

Значения критической частоты вращения вала рабочего органа в зависимости от угла подъема частицы материала для различных значений коэффициента трения приведены на рисунке 5. С ростом радиуса снижается критическое значение частоты вращения. Влияние трения незначительно.



а – частица на лопасти удалена от центра вращения на 85 мм; б – частица на лопасти удалена от центра вращения на 120 мм: 1 – коэффициент трения $f=0,1$; 2 – коэффициент трения $=0,2$; 3 – коэффициент трения $f=0,3$; 4 – коэффициент трения $f=0,4$; 5 – коэффициент трения $f=0,5$; 6 – коэффициент трения $f=0,6$

Рисунок 4 - Значения критического угла подъема частицы материала



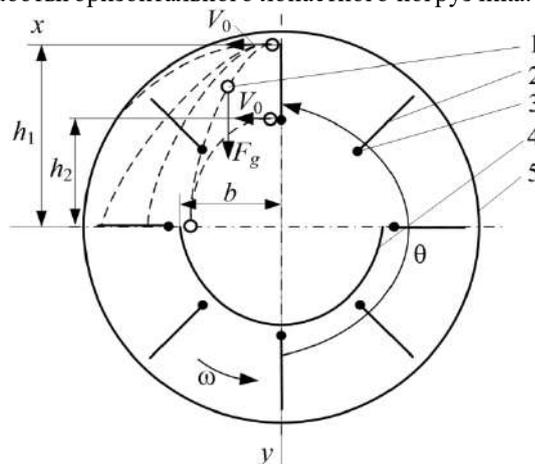
а – частица на лопасти удалена от центра вращения на 85 мм; б – частица на лопасти удалена от центра вращения на 120 мм: 1 – коэффициент трения $f=0,1$; 2 – коэффициент трения $f=0,2$; 3 – коэффициент трения $f=0,3$; 4 – коэффициент трения $f=0,4$; 5 – коэффициент трения $f=0,5$; 6 – коэффициент трения $f=0,6$

Рисунок 5 - Значения критического угла подъема частицы материала

Анализ полученных данных позволяет определить критическую частоту вращения лопастного погрузчика, при которой прекращается разгрузка лопастей от материала с учетом радиуса расположения частиц на лопасти и коэффициента трения материала по лопасти. Так при частотах вращения лопастного погрузчика более 86 мин^{-1} наблюдается фиксация материала на лопастях и тем самым прекращается циркуляция материала в смесителе (невозможна разгрузка лопастей от материала, а соответственно и поступление новых порций материала между лопастями, т.е. происходит заклинивание материалом подающего шнека).

В силу потребности схода материала с лопастей и коэффициента снижения частоты вращения равного 0,9, частота вращения лопастного погрузчика не должна превышать 77 мин^{-1} .

Кроме того, при работе транспортера возможен вариант, когда частицы материала сходят с лопасти при положении лопасти в верхнем вертикальном положении (угол $\theta=180^\circ$). При этом, в зависимости от частоты вращения вала рабочего органа погрузчика, одни частицы материала могут биться о наружный кожух лопастного ротора (после чего падают вниз), другие перелетать зону приемного лотка (рисунок 6). В данном случае (при отсутствии попадания частиц в лоток) снижается эффективность работы горизонтального лопастного погрузчика.



1 – частица материала в произвольном положении на траектории падения; 2 – лопасти погрузчика; 3 – вал ленточного рабочего органа; 4 – приемный лоток; 5 – наружный кожух лопастного ротора

Рисунок 6 - Расчетная схема к определению траектории падения частицы

Для обеспечения рациональной работы горизонтального лопастного погрузчика с радиальными лопастями необходимо обеспечить попадание частиц в зону приемного лотка (зона ограничена шириной b на рисунке 6). Для этого рассмотрим первый крайний случай, когда частица отделяется от лопасти в крайнем верхнем положении со скоростью V_0 . Учитывая, что при наличии начальной скорости частицы в направлении оси вращения рабочего органа вероятность попадания в приемный лот увеличивается, при выполнении расчетов исходим из худшего варианта – отсутствие начальной скорости вдоль радиальной лопасти. Проведем координатные оси x, y , изобразим частицу и действующие на нее силы в произвольном положении (рисунок 6) и, пренебрегая силой сопротивления воздуха составим дифференциальные уравнения движения частицы в проекция на эти оси:

$$m \frac{dV_x}{dt} = 0; m \frac{dV_y}{dt} = F_g = mg \text{ или } \frac{dV_x}{dt} = 0; \frac{dV_y}{dt} = g.$$

Разделим переменные и проинтегрируем их по времени:

$$\begin{aligned} dV_x &= 0; dV_y = g \cdot dt, \\ V_x &= \frac{dx}{dt} = C_1; V_y = \frac{dy}{dt} = g \cdot dt + C_2. \end{aligned} \quad (9)$$

Разделим переменные в (9) и еще раз проинтегрируем по времени:

$$\begin{aligned} dx &= C_1 \cdot dt; dy = g \cdot t \cdot dt + C_2 \cdot dt, \\ x &= C_1 \cdot t + C_3; y = g \cdot \frac{t^2}{2} + C_2 \cdot t + C_4. \end{aligned} \quad (10)$$

Постоянные интегрирования C_1, C_2, C_3, C_4 найдем, подставив начальные условия ($t_0=0, x=x_0=0, y=y_0=0, V_x=V_{x0}=V_0=\omega \cdot R, V_y=V_{y0}=0$) в уравнения (9) и (10). Откуда $C_1=V_0=\omega \cdot R, C_2=0, C_3=0, C_4=0$. Уравнения (9) и (10) примут вид:

$$V_x = V_0; V_y = g \cdot t; x = V_0 \cdot t; y = g \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (11)$$

При $x=b=r=d/2=0,085$ мм и $y=h_1=R=D/2=0,12$ мм уравнения (11) примут вид:

$$V_x = V_0; V_y = g \cdot t; b = \omega \cdot R \cdot t; h_1 = g \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (12)$$

Из второго уравнения (12) найдем время падения частицы в зону приемного лотка:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot h_1}{g}} = 0,156 \text{ с.}$$

Из первого уравнения (11) найдем необходимую наибольшую частоту вращения вала рабочего органа, при которой частицы материала будут попадать в зону приемного лотка[^]

$$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} = \frac{30 \cdot b}{\pi \cdot R \cdot t} = 43 \text{ мин}^{-1}.$$

Второй крайний вариант, это когда частицы, сходящие с внутреннего конца лопасти, также летят, как и с верхнего конца лопасти (рисунок 6). Поэтому нижние частицы тоже должны попасть в лоток. Движение частицы в данном случае так же описывается уравнениями (9) и (10).

В данном варианте начальные условия имеют вид $t_0=0, x=x_0=0, y=y_0=0, V_x=V_{x0}=V_0=\omega \cdot r, V_y=V_{y0}=0$.

Откуда $C_1=V_0=\omega \cdot r, C_2=0, C_3=0, C_4=0$ и уравнения (9) и (10) примут вид:

$$V_x = \omega \cdot r; V_y = g \cdot t; x = \omega \cdot r \cdot t; y = g \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (13)$$

При $x=b=r=d/2=0,085$ мм и $y=h_2=R=d/2=0,085$ мм уравнения (13) примут вид:

$$V_x = V_0; V_y = g \cdot t; b = \omega \cdot r \cdot t; h_2 = g \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (14)$$

Откуда:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot h_2}{g}} = 0,132 \text{ с} \quad \text{и} \quad n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi \cdot r \cdot t} = 73 \text{ мин}^{-1}.$$

Выводы. Таким образом, произведенный силовой анализ позволил выявить выражения, позволяющие проводить численный анализ работы устройства. Реализация численного анализа полученных выражений на основе моделирования процесса математическим пакетом Mathcad позволил выявить критические значения частоты вращения рабочего органа лопастного погрузчика с радиальными лопастями исходя из условия возможности схода материала с лопасти и условия возможности полета частиц с лопасти в приемный лоток. В силу потребности схода материала с лопастей и коэффициента снижения частоты вращения равного 0,9, частота вращения

лопастного погрузчика наружным диаметром лопастей 0,24 м и внутренним - 0,17 м, не должна превышать 77 мин⁻¹. Наибольшая частота вращения вала рабочего органа, при которой частицы материала будут попадать в зону приемного лотка с наружного конца лопасти – 43 мин⁻¹, а с внутреннего – 73 мин⁻¹. Тем самым, в процессе изготовления циркуляционного смесителя с лопастным погрузчиком с радиальными лопастями для проведения экспериментальных исследований следует обеспечить возможность изменения частоты вращения до 43 мин⁻¹. Для проверки теоретических положений в поисковых опытах требуется предусмотреть возможность изменения частоты вращения вала лопастного погрузчика до 70 мин⁻¹.

Список источников

1. Анализ существующих смесителей кормов для КРС / Мезенов А.А., Федорова Р.А. // Actualscience. 2015. Т. 1. № 5 (5). С. 61-62.
2. Обзор и анализ смесителей сыпучих кормов / Ляшенко В.С. // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2015. № 2 (18). С. 56-60.
3. Классификация технических средств для приготовления и раздачи кормовых смесей на малых фермах КРС / Фролов В.Ю., Припоров И.Е., Сысоев Д.П. / Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 114. С. 510-522.
4. Смеситель кормов: горизонтальный или вертикальный? / Петроченко Н.О. // Наше сельское хозяйство. 2022. № 8 (280). С. 30-33.
5. Мальцев В.С. Улучшение показателей приготовления концентрированных кормов с разработкой и обоснованием параметров дозатора-смесителя непрерывного действия / дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.20.01. – Пенза, 2011. – 160 с.
6. Моделирование рабочего процесса барабанного смесителя и теоретическое обоснование его параметров / Димитриев Н.В., Коновалов В.В., Терюшков В.П., Чупшев А.В. // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 1. С. 42-49.
7. Инжекционный смеситель твердых сыпучих материалов / Зиннатуллин Н.Х., Зиганшин Б.Г., Нафиков И.М., Лушнов М.А., Зиннатуллина Г.Н. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2017. Т. 12. № 3 (45). С. 68-71.
8. Вибрационные смесители сыпучих кормов / Яцунов А.Н. // Сельский механизатор. 2014. № 5. С. 24-25.
9. Устройство и теоретическое обоснование основных параметров вибрационного смесителя сыпучих кормов / Сергеев Н.С., Николаев В.Н., Гайнуллин Э.Н. // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 10. С. 52-54.
10. Результаты экспериментальных исследований лоткового вибрационного смесителя кормов непрерывного действия / Хозяев И.А., Гучева Н.В., Бахчевников О.Н., Алферов А.С. // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 4 (52). С. 81-85.
11. Разработка и исследование смесителя-ферментатора кормов для фермерских хозяйств / Оболенский Н.В., Булатов С.Ю., Свистунов А.И. // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 4 (19). С. 196-208.
12. Исследование спирального смесителя кормов / Ульянов В.М., Утолин В.В., Паршина М.В., Батирова В.А., Паршина Л.А. // Вестник аграрной науки Дона. 2019. № 4 (48). С. 26-35.
13. Обоснование параметров механического активатора смесителя-обогапителя / Полякова А.А., Каширин Д.Е. // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2017. № 1 (33). С. 75-79.
14. Исследование режимов работы центробежного смесителя сыпучих компонентов / Матюшев В.В., Бочкарев А.Н., Семенов А.В., Чаплыгина И.А. // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2021. № 4 (44). С. 206-214.
15. Аналитическое обоснование длительности цикла работы смесителя периодического действия / Коновалов В.В., Фомина М.В., Терюшков В.П., Чупшев А.В. // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 3. С. 10-15.

16. Аналитическое описание показателей работы смесителя сыпучих материалов с винтовыми лопастями / Борисова М.В., Новиков В.В., Коновалов В.В. // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 1. С. 69-78.
17. Смесители-дозаторы сухих рассыпных кормов / Ведищев С.М., Завражнов А.И., Прохоров А.В., Капустин В.П., Зазуля А.Н. // Промышленность и сельское хозяйство. 2019. № 12 (17). С. 10-14.
18. Определение параметров шнеколопастного смесителя / Хольшев Н.В., Мухин В.А., Петрова С.С. // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 1. С. 28-37.
19. Оптимизация технологических параметров смесителя с комбинированным рабочим органом / Коновалов В.В., Терюшков В.П., Чушнев А.В., Коновалов В.В. // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 3. С. 83-87.
20. Совершенствование способов и технических средств приготовления лечебных комбикормов и рабочих премиксов / Обухов А.Д. // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 1 (41). С. 59-65.
21. Исследование влияния конструктивно-технологических параметров горизонтального смесителя на показатели его рабочего процесса / Савиных П.А., Турубанов Н.В. // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 3 (47). С. 42-47.
22. Экономическое и энергетическое обоснование разработки смесителя компонентов комбикормов / Савиных П.А., Турубанов Н.В., Чернятьев Н.А. // Вестник НГИЭИ. 2023. № 6 (145). С. 7-17.
23. Разработка средств для приготовления ферментированного комбикорма в фермерских хозяйствах / Оболенский Н.В., Булатов С.Ю., Свистунов А.И. // Вестник ВИЭСХ. 2016. № 1 (22). С. 67-78.
24. Дробилки-смесители кормов. (США). ART'SwayFirstStopforGrinderMixers // PowerFarming.- 2012.-Vol. 122, N 2.-P. 55.-Англ. шифр *Росинформагротех / Суркова Т.А. // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2012. № 4. С. 1150.
25. К вопросу эффективности приготовления и раздачи кормов на предприятиях малых форм хозяйствования / Припоров И.Е., Фролов В.Ю. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 122. С. 380-403.
26. Determining the Nature of Particle Motion on the Blades of a Horizontal Drum of a Mobile Trailer / Zaitsev, V., Konovalov, V., Konovalova, A., Fomina, M., Zaitseva, V. // Lecture Notes in Networks and Systems, 2023, 509, pp. 1209–1217 DOI: 10.1007/978-3-031-11058-0_123.
27. Simulation of Particle Motion in a Cylindrical Grain Separator / V. Zaitsev, V. Konovalov, V. Konovalov / In book: Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture, Proceedings of XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021” (pp.427-436) DOI:10.1007/978-981-16-3844-2_39.
28. Смеситель сыпучих кормов / Ведищев С.М., Прохорова А.В., Хольшев Н.В., Выгузов М.Е., Ложкина Е.Б., Ноздрина А.О., Конев А.Ю., Ковалева Т.М., Неверова С.Ю. / Патентное изобретение RU 2804750 C1, 04.10.2023. Заявка № 2022129557 от 15.11.2022.

References

1. Analysis of existing feed mixers for cattle / Mezenov A.A., Fedorova R.A. // Actualscience. 2015. Vol. 1. No. 5 (5). pp. 61-62.
2. Review and analysis of bulk feed mixers / Lyashenko V.S. // Bulletin of Omsk State Agrarian University. 2015. No. 2 (18). pp. 56-60.
3. Classification of technical means for the preparation and distribution of feed mixtures on small cattle farms / Frolov V. Yu., Priporov I.E., Sysoev D.P. / Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2015. No. 114. pp. 510-522.
4. Feed mixer: horizontal or vertical? / Petrochenko N.O. // Our agriculture. 2022. No. 8 (280). pp. 30-33.
5. Maltsev V.S. Improvement of the indicators of preparation of concentrated feeds with the development and justification of the parameters of the continuous mixer dispenser / dis. for the degree of Candidate of Technical Sciences. 05.20.01. – Penza, 2011. – 160 p.

6. Modeling of the working process of a drum mixer and the theoretical justification of its parameters / Dimitriev N.V., Konovalov V.V., Teryushkov V.P., Chupshev A.V. // *Izvestiya Samara State Agricultural Academy*. 2017. No. 1. pp. 42-49.
7. Injection mixer of solid bulk materials / Zinnatullin N.H., Ziganshin B.G., Nafikov I.M., Lushnov M.A., Zinnatullina G.N. // *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*. 2017. Vol. 12. No. 3 (45). pp. 68-71.
8. Vibrating mixers of bulk feeds / Yatsunov A.N. // *Rural mechanizer*. 2014. No. 5. pp. 24-25.
9. Device and theoretical justification of the main parameters of a vibrating mixer of bulk feed / Sergeev N.S., Nikolaev V.N., Gainullin E.N. // *Achievements of science and technology of the agroindustrial complex*. 2013. No. 10. pp. 52-54.
10. Results of experimental studies of a continuous feed tray vibrating mixer / Khozyaev I.A., Gucheva N.V., Bakhchevnikov O.N., Alferov A.S. // *Technique and technologies in animal husbandry*. 2023. No. 4 (52). pp. 81-85.
11. Development and research of a feed fermenter mixer for farms / Obolensky N.V., Bulatov S.Yu., Svistunov A.I. // *Innovations in agriculture*. 2016. No. 4 (19). pp. 196-208.
12. Investigation of a spiral feed mixer / Ulyanov V.M., Utolin V.V., Parshina M.V., Batirova V.A., Parshina L.A. // *Bulletin of agrarian science of the Don*. 2019. No. 4 (48). pp. 26-35.
13. Substantiation of the parameters of the mechanical activator of the mixer-concentrator / Polyakova A.A., Kashirin D.E. // *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2017. No. 1 (33). pp. 75-79.
14. Investigation of the operating modes of a centrifugal mixer of bulk components / Matyushev V.V., Bochkarev A.N., Semenov A.V., Chaplygina I.A. // *Bulletin of the Omsk State Agrarian University*. 2021. No. 4 (44). pp. 206-214.
15. Analytical justification of the duration of the cycle of operation of a periodic mixer / Konovalov V.V., Fomina M.V., Teryushkov V.P., Chupshev A.V. // *Proceedings of the Samara State Agricultural Academy*. 2015. No. 3. pp. 10-15.
16. Analytical description of the performance indicators of a mixer of bulk materials with screw blades / Borisova M.V., Novikov V.V., Konovalov V.V. // *Izvestiya Samara State Agricultural Academy*. 2019. No. 1. pp. 69-78.
17. Mixers-dispensers of dry loose feed / Vedishchev S.M., Zavrashnov A.I., Prokhorov A.V., Kapustin V.P., Zazulya A.N. // *Industry and agriculture*. 2019. No. 12 (17). pp. 10-14.
18. Determination of the parameters of a screw-blade mixer / Kholshev N.V., Mukhin V.A., Petrova S.S. // *Izvestiya Samara State Agricultural Academy*. 2019. No. 1. pp. 28-37.
19. Optimization of technological parameters of a mixer with a combined working body / Konovalov V.V., Teryushkov V.P., Chupshev A.V., Konovalov V.V. // *Izvestiya Samara State Agricultural Academy*. 2014. No. 3. pp. 83-87.
20. Improvement of methods and technical means of preparation of medicinal compound feeds and working premixes / Obukhov A.D. // *Equipment and technologies in animal husbandry*. 2021. No. 1 (41). pp. 59-65.
21. Investigation of the influence of structural and technological parameters of a horizontal mixer on the indicators of its working process / Savinykh P.A., Turubanov N.V. // *Technique and technologies in animal husbandry*. 2022. No. 3 (47). pp. 42-47.
22. Economic and energy justification for the development of a mixer of compound feed components / Savinykh P.A., Turubanov N.V., Chernyatyevev N.A. // *Bulletin of NGIEI*. 2023. No. 6 (145). pp. 7-17.
23. Development of means for the preparation of fermented compound feed in farms / Obolensky N.V., Bulatov S.Yu., Svistunov A.I. // *Vestnik RESKH*. 2016. No. 1 (22). pp. 67-78.
24. Feed mixer crushers. (USA)]. ART'S way First Stop for Grinder Mixers // *Power Farming*.-2012.- Vol. 122, N 2.-P. 55.-English cipher *Rosinformagrotech / Surkova T.A. // *Engineering and technical support of the agroindustrial complex. An abstract journal*. 2012. No. 4. p. 1150.
25. On the issue of the effectiveness of the preparation and distribution of feed at small enterprises / Priporov I.E., Frolov V.Yu. // *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*. 2016. No. 122. pp. 380-403.

26. Determining the Nature of Particle Motion on the Blades of a Horizontal Drum of a Mobile Trailer / Zaitsev, V., Konovalov, V., Konovalova, A., Fomina, M., Zaitseva, V. // Lecture Notes in Networks and Systems, 2023, 509, pp. 1209-1217 DOI: 10.1007/978-3-031-11058-0_123.

27. Simulation of Particle Motion in a Cylindrical Grain Separator / V. Zaitsev, V. Konovalov, V. Konovalov / In book: Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture, Proceedings of XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021” (pp.427-436) DOI:10.1007/978-981-16-3844-2_39.

28. Bulk Feed mixer / Vedishchev S.M., Prokhorov A.V., Holshev N.V., Vygzov M.E., Lozhkina E.B., Nozdrina A.O., Konev A.Yu., Kovaleva T.M., Neverova S.Yu. / Patent for invention RU 2804750 C1, 04.10.2023. Application No. 2022129557 dated 11/15/2022.

Информация об авторах

М.Е. Выгузов – аспирант; С.М. Ведищев – доктор технических наук, профессор; В. Ю. Зайцев - кандидат технических наук, доцент; В.В. Коновалов – доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

M. Vygzov – graduate student; S. Vedishchev – Doctor of Technical Sciences, Professor; V. Zaitsev - candidate of technical sciences, associate professor; V. Konovalov – Doctor of Technical Sciences, Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 13.03.2024 Принята к публикации (Accepted): 15.04.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.365.32: 546.214
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-26-32

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРА И ОБЪЁМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОЧАГА ОЗОНА В ЗЕРНОВОМ ВОРОХЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ ОЗОНИРОВАНИЯ

Антон Дмитриевич Головин¹, Илья Алексеевич Пожидает², Иван Васильевич Баскаков³,
Владимир Иванович Оробинский⁴, Аркадий Васильевич Химченко⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
г. Воронеж, Российская Федерация
¹ gton_02@mail.ru, ² proda_48@mail.ru,
³ vasich2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6041-5943>,
⁴ main@agroeng.vsau.ru,
⁵ himch.arkady@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9340-4252>

Автор ответственный за переписку: Антон Дмитриевич Головин, gton_02@mail.ru
Corresponding author: Anton Golovin, gton_02@mail.ru

Реферат. На сегодняшний день одним из наиболее перспективных способов обработки сельскохозяйственной продукции является процесс озонирования. Воздействие озона на зерно позволит его обеззаразить, простимулировать ростовые процессы посевного материала, не неся за собой вредоносных выбросов в окружающую среду. Целью исследований являлось нахождение оптимального времени озонирования зерна и семян в зависимости от скорости обработки определённого объёма зернового материала. Для её достижения использовались численные методы оптимизации, а именно метод глобального поиска *patternsearch*, который позволит определить наиболее рациональный режим озонирования для заданных условий, использовались для её достижения. Очаг распространения озона в зерновом ворохе при озонировании в течение 10...60 мин по форме приближен к эллипсоиду, но имеет несколько иное математическое описание. Полученные интерполяцией математические модели позволяют определить минимальное время озонирования и максимальную скорость озонной обработки единицы объёма зернового вороха. Выявлено, что увеличение обработанного объёма зерна за счет большей продолжительности операции не имеет смысла, так как будет способствовать росту затрат энергии и средств. В заданных условиях время озонирования, равное 1270 секунд, обеспечивает максимальную скорость озонной обработки 3059 мм³/с единицы объёма зерна. Оптимизация позволит при минимальных затратах проозонировать максимальный объём зернохранилища наиболее быстро. Наименьшее время обработки единицы объёма в данных условиях составило 0,000327 с/мм³. Другие параметры озонирования будут иметь иные оптимальные значения, поэтому предложенная методика является основой соответствующей программы ЭВМ, которая автоматически определит оптимальный режим озонирования для конкретных условий.

Ключевые слова: озон, озонозодушная смесь, форма, размер, распространение озона в зерновом ворохе, время.

THEORETICAL PREREQUISITES FOR DETERMINING OF THE SIZE AND VOLUME OF OZONE DISTRIBUTION IN A GRAIN HEAP AND OPTIMIZATION OF OZONIZATION TIME

Anton Golovin¹, Ilya Pozhidaev², Ivan Baskakov³, Vladimir Orobinsky⁴, Arkady Khimchenko⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great,
Voronezh, Russian Federation

¹ gton_02@mail.ru, ² proda_48@mail.ru, ³ vasich2@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-6041-5943>, ⁴ main@agroeng.vsau.ru,

⁵ himch.arkady@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9340-4252>

Abstract. *One of the most promising methods for processing agricultural products today is the ozonation process. The effect of ozone on grain will allow it to be disinfected and stimulate the growth processes of the seed, without causing harmful emissions into the environment. The purpose of the research was to find the optimal time for ozonation of grain and seeds depending on the processing speed of a certain volume of grain material. To achieve it, numerical optimization methods were used, namely the patternsearch global search method, which will determine the most rational ozonation regime for given conditions, were used to achieve it. The source of ozone propagation in a grain heap during ozonation for 10...60 minutes is close in shape to an ellipsoid, but has a slightly different mathematical description. The mathematical models obtained by interpolation make it possible to determine the minimum ozonation time and the maximum speed of ozone treatment per unit volume of a grain heap. It was revealed that increasing the processed volume of grain due to the longer duration of the operation does not make sense, as it will contribute to an increase in energy and cost costs. Under given conditions, an ozonation time of 1270 seconds provides a maximum ozone treatment rate of 3059 mm³/s per unit volume of grain. Optimization will make it possible to ozone the maximum volume of a grain storage facility as quickly as possible at minimal cost. The shortest processing time per unit volume under these conditions was 0.000327 s/mm³. Other ozonation parameters will have different optimal values, therefore the proposed methodology is the basis of an appropriate computer program that will automatically determine the optimal ozonation regime for specific conditions.*

Keywords: *ozone, ozone-air mixture, shape, size, ozone distribution in the grain heap, time.*

Для цитирования: Головин А.Д., Пожидаев И.А., Баскаков И.В., Оробинский В.И., Химченко А.В. Теоритические предпосылки определения размера и объёма распространения очага в зерновом ворохе и оптимизации времени озонирования // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 26-32. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-26-32>.

For citation: Golovin A., Pozhidaev I., Baskakov I., Orobinsky V., Khimchenko A. Theoretical prerequisites for determining of the size and volume of ozone distribution in a grain heap and optimization of ozonization time. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 68(2): 26-32. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-26-32>.

Введение. В связи с неуклонным ростом валового сбора зерновых культур в нашей стране остро стоит вопрос о сохранности и по возможности увеличении качества собранного урожая в период его хранения. Конечно же, чтобы зерно или семена не теряли свои свойства необходимо на них каким-либо образом воздействовать. Некачественная сельскохозяйственная продукция или её порча в период хранения приведёт к дефициту продуктов питания на мировом рынке.

Известны способы поддержания качества зерна и семян при хранении на должном уровне. Однако одни из них негативно сказываются на экологии, а другие снижают некоторые свойства, например всхожесть. Поэтому агропромышленные предприятия стараются найти такие способы обработки, которые были бы безопасны для природы и не оказывали вредного воздействия на другие показатели зерна и семян. Необходимо внедрять в технологический процесс экологически безопасные методы обработки, которые позволят свести к минимуму использование опасных химических веществ. Одним из таких методов, способствующих безопасному хранению зерна и посевного материала, относится озонная обработка [3]. За счёт своих окислительных свойств, озон позволяет предотвратить развитие вредных микроорганизмов и насекомых, а также стимулирует ростовые свойства семян сельскохозяйственных культур. При этом озонирование не оказывает вредного воздействия на окружающую среду, поскольку газ распадается до кислорода, лишь обогащая атмосферу [2]. Таким образом, использование экологически чистых методов озонной обработки зерна и семян является перспективным направлением исследований, направленным на поддержание их качества при хранении и снижение негативного влияния сельскохозяйственной деятельности на окружающую среду.

Целью исследований является оптимизация времени озонирования зерна и семян в зависимости от скорости обработки определённого объёма зернового материала.

Результаты и их обсуждение. В Воронежском ГАУ были проведены теоретические исследования, направленные на определение формы и размера очага распространения озона в зерновом ворохе в зависимости от времени озонирования. Установлено [1], что зона расхождения газа в зерне приближена к эллипсоиду, но имеет несколько иное математическое описание, которое можно представить моделями на основе регрессии Гауссовых процессов [7]. Однако интересна не только форма, но и его реальный размер. Соотношение размеров очага распространения озона в зерновом ворохе в зависимости от времени озонирования, полученное экспериментальным путём и представленное в виде точечной диаграммы (scatter plot), позволяющей оценить разброс значений различных параметров, приведено на рисунок 1.

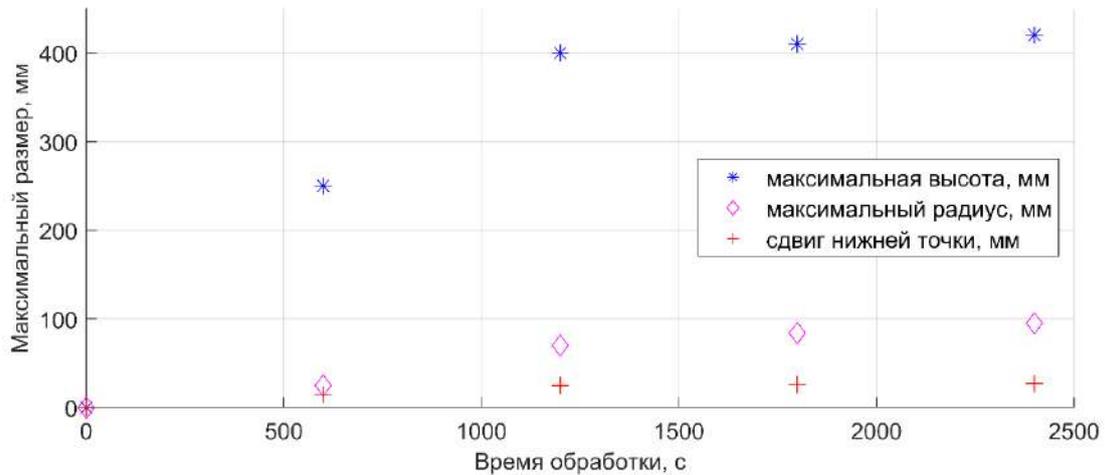


Рисунок 1 – Точечная диаграмма (Scatter plot) соотношение размеров очага распространения озона в зерновом ворохе в зависимости от времени озонирования

Анализ результатов исследований [7] показывает, что можно определить параметры формы очага распространения озона в зерне в зависимости от времени обработки. Данные значения привязаны к максимальным размерам [8]. Следовательно, зная последние, и как они меняются по времени, можно определить форму и рассчитать объём в любой момент обработки. Данные закономерности крайне сложно описать типовыми математическими моделями, но они хорошо моделируются кусочно-полиномиальным методом РСНП [6] (рисунки 2–4).

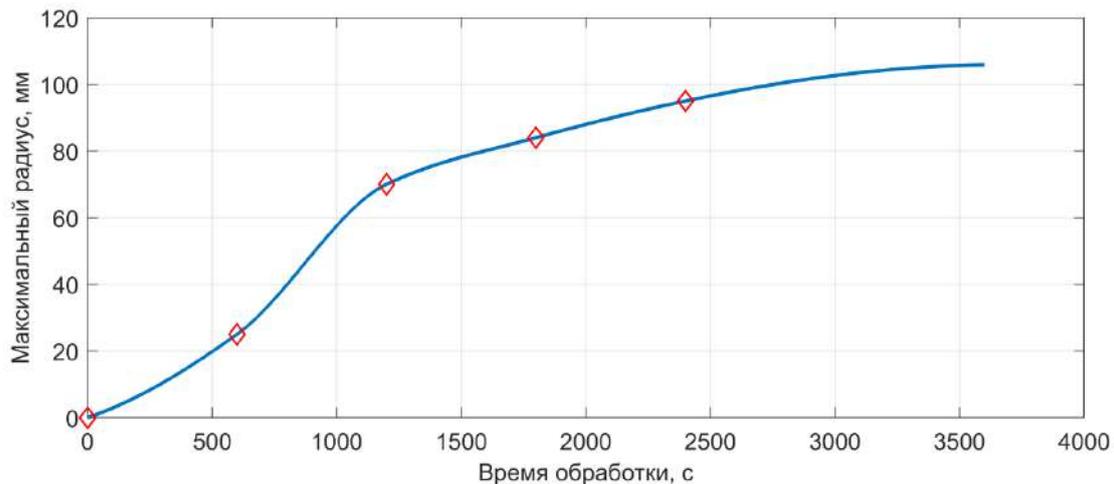


Рисунок 2 – Результат предсказаний максимального радиуса очага распространения озона в зерне

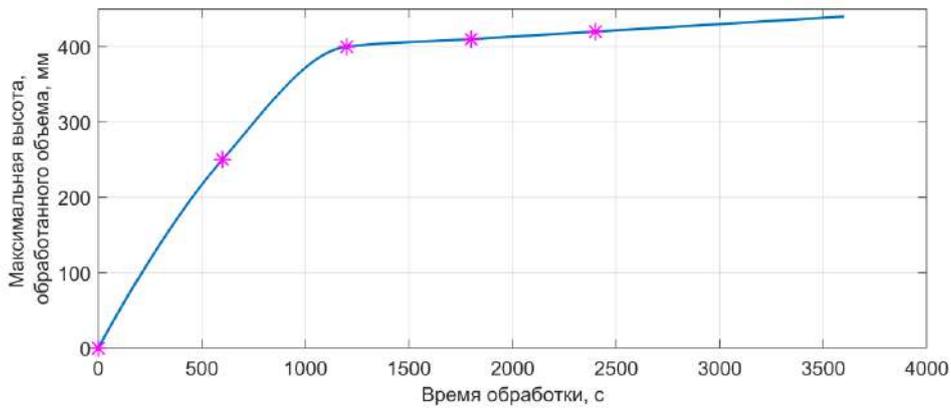


Рисунок 3 – Результат предсказаний максимальной высоты очага распространения озона в зерне

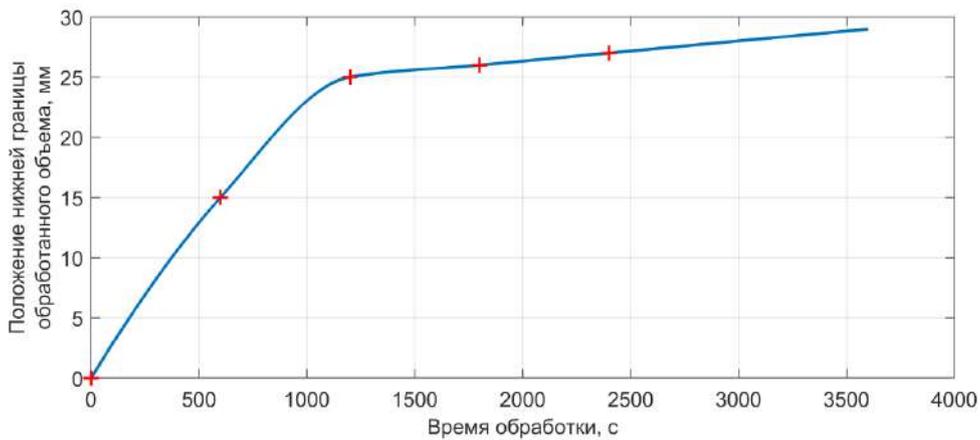


Рисунок 4 – Результат предсказаний максимального сдвига нижней точки очага распространения озона в зерне

Исходя из ранее полученных результатов [7] объём (V) обработанной поверхности зернового материала определяется интегрированием, которое можно представить в цилиндрической системе координат в виде следующего выражения:

$$V = \int_0^h \int_0^{2\pi} r(\varphi, h) d\varphi dh, \quad (1)$$

где $r(\varphi, h)$ – зависимость радиуса очага распространения озона в зерне от высоты h при угле φ поворота радиус-вектора точки или границы обработанной поверхности.

Тогда с учётом изменения по времени данное уравнение примет следующий вид:

$$V(t) = \int_0^h r(t, h(t)) \int_0^{2\pi} d\varphi dh = \int_0^h 2\pi \frac{r(t, h(t))^2}{2} dh, \quad (2)$$

где t – время обработки, с.

В итоге преобразований выражение (2) будет иметь следующий вид:

$$V(t) = \int_0^{h_{\max}(t)} 2\pi \frac{(r_{\max}(t) r_{\text{омн}}(h_{\text{омн}}, t))^2}{2} dh \quad (3)$$

Значения объема получены численным интегрированием [5]. Оно проводилось с шагом, обеспечивающим погрешность не выше 0,1%. В результате получена зависимость изменения объема обработанного озонем зерна от времени озонирования (рисунок 5).

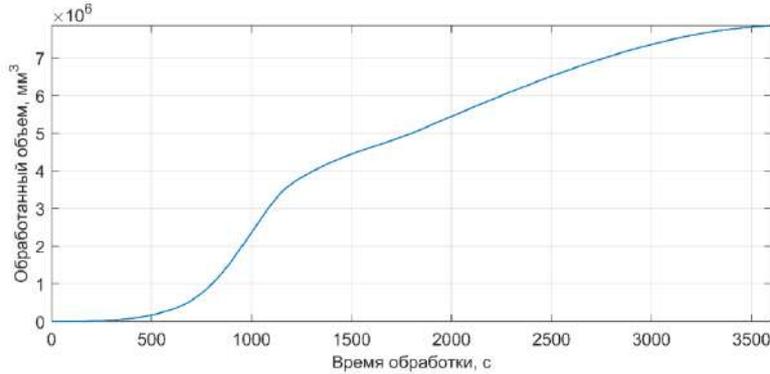


Рисунок 5 – Изменение объема очага распространения озона в зерне в зависимости от времени обработки

Из графика видно, что он имеет некоторые точки перегиба. Следовательно, скорость изменения объема обработанного озонем зерна в этих точках меняется. Поэтому она может быть критерием оптимизации. Скорость обработки (v_v) озонем объема зерна в общем виде может быть записана как

$$v_v(t) = \frac{V(t)}{t}. \quad (4)$$

Определение оптимального времени обработки зерна озонем с точки зрения наибольшей скорости изменения проозонированного объема получено с помощью численных методов оптимизации. Они в основном сводятся к поиску минимума. Максимум является обратной функцией. Как правило, различные методические приёмы могут давать некоторые отклонения в результатах. В конечном итоге выбор пал на метод глобального поиска patternsearch [4], поскольку данные получены обработкой экспериментальных значений с использованием численных методов. Эта методология позволяет определить локальные минимумы. Результаты исследований представлены на рисунке 6.

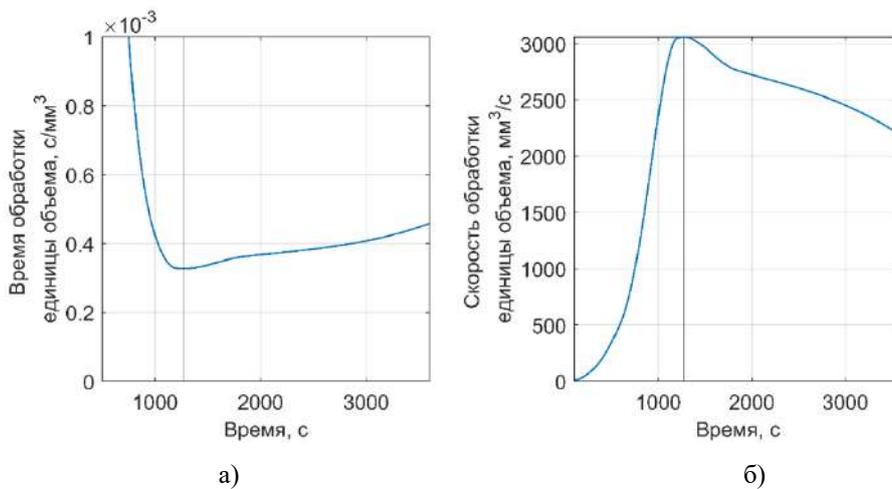


Рисунок 6 – Время (а) и скорость (б) обработки озонем единицы объема зерна в зависимости от времени озонирования

Вертикальной линией (рис. 6) показано минимальное время обработки озоном единицы объёма зерна. Анализ результатов исследований показывает, что скорость обработки озоновоздушной смеси в зерновом ворохе растёт и в момент времени 1270 секунд происходит перегиб. Это означает, что в данный момент объём, в который поступила озоновоздушная смесь, максимальный. Далее он начинает постепенно снижаться. Увеличение объёма будет происходить, но не так интенсивно. Стоит отметить, что данное время обработки, оптимально для этого эксперимента. Можно предположить, что спад скорости роста объёма связан с тем, что происходит поглощение газа зерном в средних слоях. Нельзя утверждать, что распространение озона в зерновом ворохе будет происходить равномерно. Ведь ближайшие к месту подачи слои получают большие дозы озонной обработки, чем более удалённые горизонты. Поэтому, очевидно, нет необходимости в дальнейшем увеличении обработанного объёма за счет повышения времени озонирования. Смысл имеет рациональное размещение некоторого количества источников подачи озоновоздушной смеси в зерно для того, чтобы за один раз провести озонирование необходимого объёма. Следовательно, стоит определить на каком расстоянии друг от друга надо устанавливать подающие озон сопла, чтобы обработка была равномерной.

Заключение. Таким образом, удалось достичь поставленной цели и получить математические модели изменения размера и объёма очага распространения озона в зерне, позволяющие определить минимальное время озонирования и максимальную скорость озонной обработки единицы объёма зернового вороха. Поскольку полученные зависимости имеют экстремумы, то значит можно найти оптимальные значения изменяемых параметров. Очевидно, что нет необходимости дальнейшего увеличения обработанного объёма зерна за счет большей продолжительности операции, поскольку это будет способствовать росту затрат энергии и средств. В заданных условиях минимальное время озонирования 1270 секунд, обеспечивает максимальную скорость озонной обработки $3059 \text{ мм}^3/\text{с}$ единицы объёма зерна. Реализация предложенного алгоритма в соответствующей программе ЭВМ, позволит найти оптимальный режим озонирования для конкретных условий. Это в свою очередь необходимо для нахождения рабочей зоны озона в зерновом ворохе при заданных параметрах и создаёт предпосылки для определения рационального количества сопел, подающих озоновоздушную смесь, обеспечивающих наилучшую равномерность распространения газа в зерновом материале. Тем самым при минимальных затратах будет обработан максимальный объём зерна за наименьшее время.

Список источников

1. Головин А.Д., Пожидаев И.А., Баскаков И.В., Оробинский В.И., Химченко А.В. Теоретические предпосылки определения формы и размера очага распространения озона в зерновом ворохе // Наука в Центральной России. – 2024. – Т.67, № 1. – С. 76-89. – DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-76-89.
2. Нормов Д.А., Пожидаев Д.В., Волов Р.В., Чижов Д.С., Тимофеев В.П. Исследование влияния электроозонирования на всхожесть семян // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – №112. – С.1438-1451.
3. Audet Charles, J. E. Dennis Jr. Analysis of Generalized Pattern Searches // *SIAM Journal on Optimization*. – 2003. – Vol. 13(3). – Pp. 889-903. – DOI: 10.1137/S1052623400378742.
4. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Gievsky A.V., Chernyshov A.V. Influence of ozonation in seed storage on corn grain yield and its quality // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness (TSIA-2019) (Russia, Stavropol, October 21-22, 2019). – IOP Publishing Ltd, 2020. – Vol. 488. – № 012007. – 6 p. – DOI: 10.1088/1755-1315/488/1/012007.
5. Kahaner D., Moler C., Nash S. Numerical Methods and Software. Upper Saddle River. – New Jersey: Prentice Hall, 1988. – 495 p. – DOI: 10.1137/1033033.
6. Fritsch F.N., Carlson R.E. Monotone Piecewise Cubic Interpolation // *SIAM Journal on Numerical Analysis*. – 1980. – Vol. 17(2). – Pp.238-246. – DOI: 10.1137/0717021.
7. Rasmussen C.E., Williams C.K.I. Gaussian Processes for Machine Learning. – Cambridge: MIT Press, 2006 – 272 p. – DOI: 10.1142/S0129065704001899.

8. Statistics and Machine Learning Toolbox. User's Guide. Math- Works: Documentation R. 2022a. – Math Works, 2022. – 10346 p.

References

1. Golovin A.D., Pozhidaev I.A., Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Khimchenko A.V. Theoretical prerequisites for determining the share and size of the ozone distribution center in a grain heap // Science in the Central Russia – 2024. – Vol. 67(1). – Pp. 76-89. – DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-76-89.

2. Normov D.A., Pozhidaev D.V., Volov R.V., Chizhov D.S., Timofeev V.P. Studying the influence of electrical ozonation to seed germination // Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. – 2015. – Vol. 112. – Pp. 1438-1451.

3. Audet Charles, J. E. Dennis Jr. Analysis of Generalized Pattern Searches // *SIAM Journal on Optimization*. – 2003. – Vol. 13(3). – Pp. 889-903. – DOI: 10.1137/S1052623400378742.

4. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Gievsky A.V., Chernyshov A.V. Influence of ozonation in seed storage on corn grain yield and its quality // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness (TSIA-2019) (Russia, Stavropol, October 21-22, 2019). – IOP Publishing Ltd, 2020. – Vol. 488. – № 012007. – 6 p. DOI: 10.1088/1755-1315/488/1/012007.

5. Kahaner D., Moler C., Nash S. Numerical Methods and Software. Upper Saddle River. – New Jersey: Prentice Hall, 1988. – 495 p. – DOI: 10.1137/1033033.

6. Fritsch F.N., Carlson R.E. Monotone Piecewise Cubic Interpolation // *SIAM Journal on Numerical Analysis*. – 1980. – Vol. 17(2). – Pp.238-246. DOI: 10.1137/0717021.

7. Rasmussen C.E., Williams C.K.I. Gaussian Processes for Machine Learning. – Cambridge: MIT Press, 2006 – 272 p. DOI: 10.1142/S0129065704001899.

8. Statistics and Machine Learning Toolbox. User's Guide. Math- Works: Documentation R. 2022a. – Math Works, 2022. – 10346 p.

Информация об авторах

А.Д. Головин – ведущий инженер, И.А. Пожидаев – ведущий инженер, И.В. Баскаков – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; В.И. Оробинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; А.В. Химченко – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

A. Golovin – Leading Engineer, I. Pozhidaev – Leading Engineer, I. Baskakov – Full Doctor of Agricultural Sciences, Professor; V. Orobinsky – Full Doctor of Agricultural Sciences, Professor; A. Khimchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 21.03.2024 Принята к публикации (Accepted): 22.04.2024

Тип статьи: научная

УДК 621.437

DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-33-46

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

**Юрий Викторович Родионов¹, Андрей Александрович Баглаев²,
Алексей Алексеевич Свиридов³, Александр Викторович Север⁴,
Иван Геннадьевич Хохлов⁵, Vadim Геннадьевич Кубасов⁶**

¹ Мичуринский государственный аграрный университет, г. Мичуринск, Российская Федерация

¹ Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация

^{2,3,4,5} ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

г. Воронеж, Российская Федерация

^{1,6} rodionow.u.w@rambler.ru

^{2,3,4,5} xoxlov.ivan.2002@mail.ru

Автор ответственный за переписку: Юрий Викторович Родионов, rodionow.u.w@rambler.ru
Corresponding author: Yuri Rodionov, rodionow.u.w@rambler.ru

Реферат. Рассматривается актуальная проблема эксплуатации автомобильной техники в условиях низких температур, связанная с потерей дизельным топливом своих свойств (снижению температуры помутнения и кристаллизации топлива), в результате чего происходят отказы техники из-за выхода из строя системы питания и непосредственно замерзание топлива в трубках, выпадение парафина, приводящее к забиванию топливных фильтров. На отечественной автомобильной технике каких-либо эффективных средств подогрева дизельного топлива нет, что и заставляет водителей, эксплуатирующих технику в суровых климатических условиях пользоваться своими, индивидуальными разработками. Для этих целей разработано устройство, позволяющее подогреть все дизельное топливо, залитое в топливный бак. Привод устройства (топливоподкачивающего насоса) предлагается электрический (от линейного электродвигателя), от бортовой сети автомобиля, тип используемого насоса поршневой, двухстороннего действия. Представлен комплексный расчет топливоподкачивающего насоса с целью определения его основных характеристик и конструктивных размеров. Представлена принципиальная схема установки разработанного устройства и всех элементов в системе питания дизельного двигателя. Внедрение предлагаемого технического решения осуществлялось в системе питания дизельного двигателя ЯМЗ-238 установленного на нагрузочном стенде в условиях его эксплуатации в условиях низких температур (крайнего севера и др.). Полученные результаты проведенных испытаний на стендовом двигателе подтверждают актуальность проведенных исследований и показали, что использование разработанного технического решения позволит подогреть все дизельное топливо, залитое в бак автомобиля до температуры плюс 50 оС, тем самым исключить возможность его кристаллизации и помутнения и в целом снизит количество отказов автомобильной техники, связанных с этой проблемой.

Ключевые слова: дизельное топливо, дизельный двигатель, подогрев топлива, автомобильная техника, система питания, низкие температуры.

IMPROVING THE PERFORMANCE OF A DIESEL INTERNAL COMBUSTION ENGINE

**Yuri Rodionov¹, Andrey Baglaev², Alexey Sviridov³, Alexander Sever⁴,
Ivan Khokhlov⁵, Vadim Kubasov⁶**

¹ Michurinsky State Agrarian University, Michurinsk, Russian Federation

^{1,6} Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

^{2,3,4,5} Military educational scientific center air force «air force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin», Voronezh, Russian Federation

^{1,6}rodionow.u.w@rambler.ru
^{2,3,4,5}xoxlov.ivan.2002@mail.ru

Abstract. *The current problem of operating automotive equipment at low temperatures associated with the loss of diesel fuel's properties (reducing the cloud point and crystallization of the fuel) is being considered, resulting in equipment failures due to failure of the power system and direct freezing of the fuel in the tubes, paraffin deposition leading to clogging of fuel filters. Domestic automotive vehicles do not have any effective means of heating diesel fuel, which forces drivers operating equipment in harsh climatic conditions to use their own individual developments. For these purposes, a device has been developed that allows you to heat all the diesel fuel poured into the fuel tank. The drive of the device (fuel priming pump) is proposed to be electric (from a linear electric motor), from the vehicle's on-board network, the type of pump used is piston, double-acting. A comprehensive calculation of the fuel priming pump is presented in order to determine its main characteristics and design dimensions. A schematic diagram of the installation of the developed device and all elements in the diesel engine power system is presented. The implementation of the proposed technical solution was carried out in the power system of the YaMZ-238 diesel engine installed on a load stand under conditions of its operation in low temperatures (the Far North, etc.). The obtained results of tests on a bench engine confirm the relevance of the research and showed that the use of the developed technical solution will allow heating all the diesel fuel poured into the car tank to a temperature of plus 50 °C, thereby eliminating the possibility of its crystallization and cloudiness and, in general, reducing the number of vehicle failures. techniques related to this problem.*

Keywords: *diesel fuel, diesel engine, fuel heating, automotive equipment, power supply system, low temperatures.*

Для цитирования: Родионов Ю.В., Баглаев А.А., Свиридов А.А., Север А.В., Хохлов И.Г., Кубасов В.Г. Повышение эксплуатационных показателей дизельного двигателя внутреннего сгорания // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 33-46. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-33-46>

For citation: Rodionov Yu., Baglaev A., Sviridov A., Sever A., Khokhlov I., Kubasov V. Increasing the performance indicators of a diesel internal combustion engine. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 68(2): 33-46. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-33-46>.

Введение. Система питания дизельных двигателей при эксплуатации в зимних условиях, особенно в климатических зонах с суровым климатом, является причиной очень частых отказов автомобильной техники. Немалую роль в этом играют дизельные топлива, которые по различным причинам теряют свои свойства (например, как температура помутнения и кристаллизации, кинематическая вязкость и процентное содержание воды). На отечественной автомобильной технике каких-либо эффективных средств разогрева дизельного топлива в топливном баке нет, что и заставляет водителей, эксплуатирующих технику в суровых климатических условиях пользоваться своими, индивидуальными разработками. Это и установка лампочек в топливные баки, подключенные к бортовой сети и другие. Но использование выпускных газов для разогрева баков или фильтров, расположенных слева автомобиля, делает это способ неприемлемым при сильных морозах и отсутствие ветра (такие условия характерны для Крайнего Севера) потому, что отработавшие газы образуют на дороге туман, зависающий над дорогой на длительное время и не позволяющий движение по ней. Именно тщательное изучение условий эксплуатации автомобильной техники при низких температурах, и анализ конструктивных решений, применяемых на автомобильной технике призванных улучшить их условия работы в указанных условиях, привело к необходимости осуществления модернизации элемента системы питания, такого как топливоподкачивающий насос [1].

В условиях низких температур штатные топливоподкачивающие насосы, установленные в системе питания двигателей внутреннего сгорания (ДВС) не выполняют функций разогрева топлива и при потере текучести топлива (под воздействием низких температур) и не высоких разрежениях во всасывающих полостях утрачивают свои функциональные задачи по подаче

топлива к топливному насосу высокого давления (ТНВД) и являются, поэтому наиболее вероятным направлением модернизации системы питания. Это же касается и топливных баков, которые также не имеют эффективных средств разогрева топлива для суровых климатических условий и поэтому очень часто в таких условиях являются причинами отказов систем питания дизелей ВАТ из-за температурных изменений состояния топлива, следовательно, могут быть наиболее вероятным направлением модернизации.

Следует отметить, что предпусковые подогреватели двигателей в основном отвечают предъявленным к ним требованиям и обеспечивают быстрый и надежный разогрев и пуск двигателей, но при условии, что топливо находится в пригодном для использования состоянии, но поскольку именно топливо не позволяет зачастую осуществить их запуск. Поэтому необходимо рассмотреть модернизацию штатной системы питания для безотказной ее работы в условиях низких температур [2].

Результаты и обсуждение. Практически все образцы автомобильной техники имеют штатные средства предпускового разогрева двигателя и, как правило, питаются они от систем питания двигателей автомобильной техники.

Для разогрева всего топлива, находящегося, например, в 300-литровом баке, требуется много энергии, поэтому перед пуском предпускового подогревателя или двигателя, необходимо разогреть такое количество топлива, которое обеспечило безотказные запуски и работу в начальный период, а при работе интенсивность разогрева топлива должна превышать потребляемое им количество топлива [3].

Используя табличные значения, получим часовые расходы топлива для предпусковых подогревателей, работающих на дизельном топливе, которые будут составлять:

ПЖД-400 (ПЖБ-44)	– 6,6 кг/г;
ПЖД-600	– 9,0 кг/г;
ПЖД-30	– 4,0 кг/г.

Часовой расход автомобилей составляет:

УРАЛ-4320 (двигатель ЯМЗ-238)	– 49,0 л/ч.;
КАМАЗ-5350 (двигатель КАМАЗ-740.30)	– 41,5 л/ч.;

Принимает усредненный часовой расход – 7 л/ч. для подогревателей, 48 л/ч. – для двигателей.

Разогрев топлива в топливном баке рассматриваем, как теплообмен в замкнутой системе. При расчетах используем уравнение теплового баланса и 1-го закона термодинамики:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = 0, \quad (1)$$

$$Q = \Delta V + A, \quad (2)$$

где

$$\Delta V = V_2 - V_1. \quad (3)$$

Теплоемкость тела G выражается в Дж/к.

Удельная теплоемкость C выражается в Дж/(кг К), получаем:

$$G = m \cdot C, \quad (4)$$

где m – масса тела, кг.

Общую формулу для определения количества теплоты можно записать в виде:

$$Q = Cm \cdot (t_2 - t_1) = CM\Delta t, \quad (5)$$

где Q – количество теплоты необходимой для разогрева топлива массой m , в температурном интервале Δt , Дж; C – удельная теплоемкость дизельного топлива, равная 1,1628 Дж/кг °С; Δt – разность температур, получаемых в результате нагрева.

Для обеспечения безотказного запуска двигателя и предпускового подогревателя определяем количество разогретого топлива равным полуторачасовому расходу, что для подогревателей составит – 10,5 л, для двигателей – 72 л.

Исходя из того, что данное количество топлива должно быть, разогрето в зоне топливозаборника и не все тепло будет расходоваться на это, введем коэффициент 0,2, тогда количество тепла в зоне топливозаборника будет равно 2251,8 ккал (9428 Дж). При этом необходимо помнить, что предпусковые подогреватели работают 35...40 мин., т.е. количество разогретого топлива необходимо уменьшить на 0,59...0,75, что составит 7,9 л, но для пуска достаточно и 0,1 от 7,9 л, т.е. 0,8 л. Удельная теплоемкость дизельного топлива 1,9...2,6 кДж/кг °С.

Расчеты необходимого количества тепла для разогрева данного количества топлива при различных температурах, производим по формуле (6):

$$Q = Cm \cdot (t_2 - t_1) = CM\Delta t. \quad (6)$$

Учитывая, что C и m в нашем случае неизменны, Δt – задаем, -10°C – для зимнего топлива, -20°C – для арктического. Данные расчетов представлены в таблице 1.

Аналогично определяем количество необходимой теплоты для подогрева топлива, для обеспечения запуска двигателя, а данные представлены в таблице 2.

Необходимое количество теплоты для разогрева топлива (7,2 л), необходимого для запуска двигателя.

Исходя из мощности теплового потока, создаваемого электромагнитными обмотками топливоподкачивающего насоса равным 17322 к за 1,4 с, получим 72,5 кДж за 1,4 с или 51,78 кДж/с. С учетом коэффициента полезного действия электромагнитных обмоток, как нагреваемых элементов в зоне топливозаборника, равным 0,2 и скорости тепловых потерь бака в атмосферу равных 0,12 кДж/с, полезная мощность теплового потока будет составлять $51,78 \text{ кДж/с} \cdot 0,2 - 0,12 \text{ кДж/с} = 10,27 \text{ кДж/с}$.

Таблица 1 – Результаты расчетов необходимого количества тепла при различных температурах

Температура внешней среды, $^\circ\text{C}$	Необходимая температура топлива, $^\circ\text{C}$				
	10	5	0	-10	-20
	Количество теплоты, кДж				
	2	3	4	5	6
1					
5	8,8				
0	17,6	8,8			
-5	26,4	17,6	8,8		
-10	32,2	26,4	17,6		
-15	44,0	32,2	26,4	8,8	
-20	52,8	44,0	32,2	17,6	
-25	61,6	52,8	44,0	26,4	8,8
-30	70,4	61,6	52,8	32,2	17,6
-35	79,2	70,4	61,6	44,0	26,4
-40	88,0	79,2	70,4	52,8	32,2
-45	96,8	88,0	79,2	61,6	44,0
-50	105,6	96,8	88,0	70,4	52,8

Таблица 2 – Необходимое количество теплоты для разогрева топлива

Температура внешней среды, $^\circ\text{C}$	Необходимая температура топлива, $^\circ\text{C}$				
	10	5	0	-10	-20
	Количество теплоты, кДж				
5	79,2				
0	158,4	79,2			
-5	237,6	158,4	79,2		
-10	316,8	237,6	158,4		
-15	396,0	316,8	237,6	79,2	
-20	457,2	396,0	316,8	158,4	
-25	554,4	475,2	396,0	237,6	79,2
-30	633,6	554,4	475,2	316,8	158,4
-35	712,8	633,6	554,4	396,0	237,6
-40	792,0	712,8	633,6	475,2	316,8
-45	871,2	792,0	712,8	554,4	396,0
-50	950,4	871,2	792,0	633,6	475,2

Используя данные, приведенные в таблице 1 и 2 определяем время разогрева топлива для обеспечения безотказной работы двигателя и предпускового подогревателя, которое вычисляем по формуле:

$$g = \gamma \cdot (t_{жс} - t_c). \quad (7)$$

Затем вычисляем:

$$T = \frac{Q}{g}, \quad (8)$$

где g – плотность теплового потока, Вт/(м²·к); γ – коэффициент теплоотдачи; $(t_{жс} - t_c)$ – температуры теплоносителя и стенки; T – время, с.

Результаты проведенных расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Время разогрева топлива для обеспечения безотказной работы предпускового подогревателя (0,8 л) и двигателя (7,2 л)

Температура внешней среды, °С	Необходимая температура топлива, °С				
	10	5	0	-10	-20
	Время нагрева, с предпусковым подогревателем двигателя				
5	1,0 (7,7)				
0	2,0 (15,5)	1,0 (7,7)			
-5	2,6 (23,2)	1,7 (15,5)	1,0 (7,7)		
-10	3,2 (31,0)	2,6 (23,2)	1,7 (15,5)		
-15	4,3 (38,6)	3,2 (31,0)	2,6 (23,2)	1,0 (7,7)	
-20	5,2 (46,3)	4,3 (38,6)	3,2 (31,0)	1,0 (15,5)	
-25	6,0 (54,0)	5,2 (46,3)	4,3 (38,6)	1,7 (23,2)	1,0 (7,7)
-30	6,9 (62,0)	6,0 (54,0)	5,2 (46,3)	2,6 (31,0)	1,0 (7,7)
-35	7,7 (69,9)	6,9 (62,0)	6,0 (54,0)	3,2 (38,6)	1,7 (23,2)
-40	8,6 (77,2)	7,7 (69,5)	6,9 (62,0)	4,3 (46,3)	2,6 (31,0)
-45	9,5 (85,0)	8,6 (77,2)	7,7 (69,5)	5,2 (54,0)	3,2 (38,6)
-50	10,3 (93,0)	9,5 (85,0)	8,6 (77,2)	6,0 (62,0)	4,3 (46,3)

Таким образом, предлагается разработка топливоподкачивающего насоса, который будет устанавливаться непосредственно в топливный бак (в нижней передней части) и предназначен для подогрева дизельного топлива в топливном баке, и подачи его под давлением к ТНВД.

Привод насоса предлагается электрический, от бортовой сети автомобиля или внешнего источника (возможно перед пуском двигателя), тип используемого насоса поршневой, двухстороннего действия, а привод от линейного электродвигателя. При этом подогрев топлива в баке осуществляется за счет принудительного охлаждения топливом обмоток электродвигателя и поршня насоса, а при работе двигателя, еще и за счет слива излишков топлива от ТНВД, форсунок и фильтров [4].

Разработанный насос двухстороннего принципа действия, подача топлива к ТНВД осуществляется только при ходе поршня насоса в одну сторону, при обратном ходе поршня, подогретое топливо вытесняется обратно в бак – в зону топливозаборника. Туда же сливаются и излишки топлива при работающем двигателе. Основные элементы разработанного насоса показаны на рисунке 1.

Управление работой насоса осуществляется дистанционно, из кабины водителя. Возможно, наряду с автоматическим и ручное управление.

В собранном виде насос образует ряд полостей:

- полость А – между установочным корпусом 1 и корпусом насоса 2;
- полость В – между патрубком 11 и топливозаборной трубкой 12;
- полость С – правая внутренняя полость топливоподкачивающего насоса;
- полость Д – левая внутренняя полость насоса;
- полость Е – между корпусом насоса 2 и крышкой 23.

Поддерживающее ребро 20, являясь ребром жесткости бака, в нижней своей части удвоенное сечение и окно в поперечной, относительно бака плоскости, для установки в бак установочного

корпуса 1, в сборе с топливозаборником 15, и служит дополнительной опорой для установочного корпуса 1, в который в передней части приворачивается к стенке бака.

Работа топливоподкачивающего насоса осуществляется в двух режимах:

- разогрев топлива, залитого в топливный бак;
- подогрев и подача топлива в штатную систему питания.

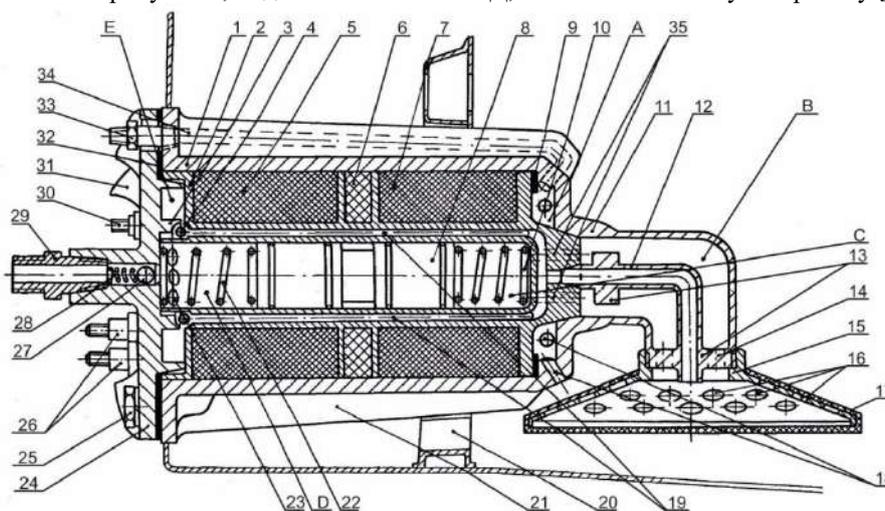
Топливоподкачивающий насос работает следующим образом.

В режиме разогрева топлива. При этом напряжение подается сразу на обе клеммы 26 и одновременно включаются обе электромагнитные обмотки 5 и 7, поршень 8 под действием возвратных пружин 10 и 22, и магнитных полей противоположно направленных, находится в исходном положении. После повышения температуры обмоток до заданных пределов они отключаются, а вновь включаются после снижения температуры до минимально заданных пределов. Отключение и включение осуществляется автоматически. Данные о температуре обмоток, поступают с 4-х датчиков, вмонтированных в обмотки и имеющие выводы на клемму 29. Температура в баке контролируется визуально, по прибору в кабине, с помощью датчика установленного в баке, либо по времени работы топливоподкачивающего насоса в режиме «разогрев», определенному опытным путем, с учетом температуры окружающего воздуха, и внесенного в инструкцию автомобиля.

Подача топлива в штатную систему при данном режиме работы отсутствует.

После достижения необходимой температуры, топлива в баке (около 50 °С), можно осуществить его подачу в систему питания двигателя к подогревателю жидкостному дизельный (ПЖД).

Если двигатель не прогреет, то топливо с помощью распределительного крана (РК), представленного на рисунке 2, подается только к ПЖД, обеспечивая его пуск и работу [4, 5].

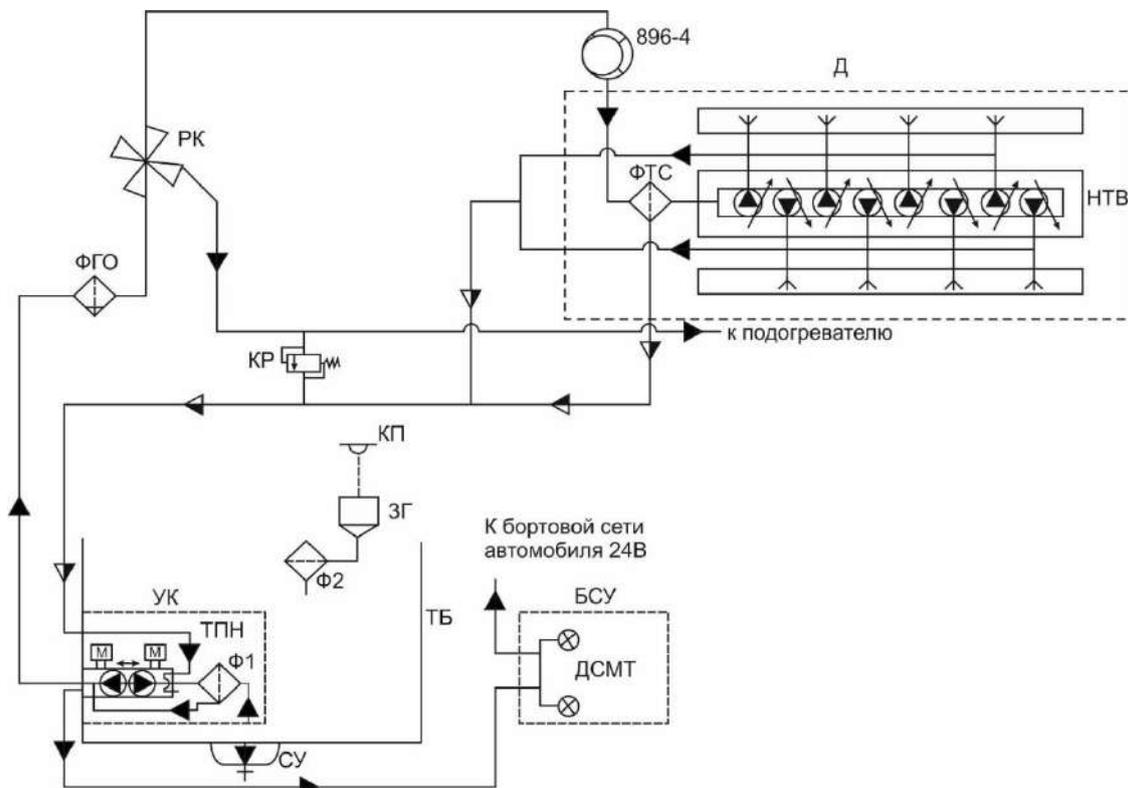


- 1 – установочный корпус, 2 – корпус насоса, 3 – обойма, 4 – запорные шариковые клапаны, 5, 7 – электромагнитные обмотки, 6 – проставка, 8 – поршень, 9 – уплотнительная прокладка, 10 – возвратная пружина, 11 – патрубок, 12 – топливозаборная трубка, 13 – ребра крепления, 14 – отверстия, 15 – топливозаборник, 16 – отверстия, 17 – сетчатый фильтр, 18 – сливные отверстия, 19 – топливоподводящие каналы, 20 – поддерживающее ребро топливного бака, 21 – ребра охлаждения, 22 – возвратная пружина, 23 – отверстия, 24 – крышка, 25 – винты, 26 – клеммы электромагнитных обмоток, 27 – шариковый нагнетательный клапан, 28 – пружина, 29 – штуцер, 30 – колеса термодатчиков, 31 – ребра охлаждения, 32 – прокладки уплотнения, 33 – штуцер сливной магистрали, 34 – канал сливной магистрали, 35 – отверстия, А – полость между установочным корпусом 1 и корпусом топливоподкачивающего насоса 2, В – полость между патрубком 11 и топливозаборной трубкой, С – правая внутренняя полость топливоподкачивающего насоса, D – левая внутренняя полость топливоподкачивающего насоса, Е – полость между корпусом топливоподкачивающего насоса 2 и крышкой 23.

Рисунок 1 – Конструктивная схема разработанного топливоподкачивающего насоса

Если двигатель прогрет до температуры, обеспечивающей его пуск и работу, то с помощью крана РК отключается ПЖД, и подключается система питания двигателя, и после ее заполнения, с помощью топливоподкачивающего насоса, можно осуществлять запуск двигателя.

В режиме подогрева и подачи топлива. Данный режим работы устанавливается после прогрева топлива в баке, включением соответствующей клавиши на пульте управления. При этом напряжение подается на одну из клемм 26, связанную с электромагнитной обмоткой 5, под действием электромагнитного поля, создаваемого этой обмоткой, поршень 8 переместиться в сторону обмотки 5, т.е. влево (рисунок 1), сжимая возвратную пружину 22 и вытесняя топливо из полости D через шариковый нагнетательный клапан 27, штуцер 29, в систему питания ПЖД или двигателя, при этом запорные шариковые клапаны 4 (шесть штук) под действием гидравлического удара закрываются. Одновременно, при этом, в полости C будет возникать разрежение, под действием которого в полость будет поступать топливо из бака, через отверстие 35, полость B, отверстия 14, топливозаборник 15, отверстия 16 и сетчатый фильтр 17.



КР – клапан редукционный; Д – двигатель тяговый; 896-4 – ТПН коловратного типа; НТВ – насос топливовпрыскивающий; ФТО – фильтр тонкой очистки; ФГО – фильтр грубой очистки; РК – распределительный кран; КП – клапан паровой; ЗГ – заливная горловина; Ф1, Ф2 – сетчатые фильтры; ТБ – топливный бак; СУ – сливное устройство; ТПН – топливоподкачивающий насос; ДСМТ – датчик-сигнализатор максимальных температур обмоток; БСУ – блок системы управления ТПН

Рисунок 2 – Схема системы питания двигателя ЯМЗ-238

После завершения подачи топлива, обмотка 5 отключается, а напряжение подается на клемму 26 связанную с электромагнитной обмоткой 7, имеющей противоположное направление магнитного поля. Под действием электромагнитного поля, создаваемого электромагнитной обмоткой 7 и возвратной пружиной 22, поршень 8 будет перемещаться в сторону электромагнитной обмотки 7 (т.е. вправо), при этом топливо из полости C (разогретое), через отверстия 35, полость B, отверстия 14, топливозаборник 15 с отверстиями 16 и сетчатый фильтр

17, часть будет поступать в бак, разогревая, находящееся там топливо, а часть, под действием разряжения, возникающего в полости D, смешиваясь с топливом из бака, поступающим через сетчатый фильтр 17, отверстия 16 в топливозаборнике 15 через топливозаборную трубку 12, топливоподкачивающие каналы 19, дополнительно в них подогреваясь, через открытые запорные шариковые клапаны 4 будет заполнять полость E и через отверстия 23 – полость D. Проходя по топливоподводящим каналам 19 топливо повышает свою температуру за счет отвода тепла от электромагнитных полей, создаваемых электромагнитными обмотками 5 и 7 (явление магнитное «гистерезиса»). Для улучшения отвода тепла от электромагнитных обмоток 5 и 7, и передачи его топливу в бак, служат так же ребра охлаждения 21 установочного корпуса 1. Далее следует процесс подачи топлива, который был рассмотрен выше.

При работе двигателя, излишки топлива от ТНВД, форсунок и фильтров – сливаются обратно в бак (в подогретом виде) через штуцер сливной магистрали 33, канал сливной магистрали 34, полость A, сливные отверстия 18, в бак, дополнительно нагреваясь на этом пути.

Производительность и работа топливоподкачивающего насоса предлагается конструкции, легко поддается процессам автоматизации. Так, например, частоту колебаний поршня можно регулировать в широких пределах очень плавно, и плавно меняя тем самым и давление, и производительность насоса.

Способность насоса разогревать, перед подачей топливо, позволяет использовать его для различных топлив, в том числе и мазута, с утечки легких топлив через зазоры легко компенсировать увеличением производительности.

Отсутствие каких-либо вращающихся или трущихся поверхностей обеспечивает ему хорошие перспективы по надежности и долговечности. Трение между поршнем и цилиндром следует считать очень малым, т.к. поршень будет перемещаться во взвешенном (за счет электромагнитных полей) состоянии, относительно стенок цилиндров. Поломка же любой из имеющихся в насосе пружин, не изменит его работоспособность [6].

Отсутствие щеточных узлов, имеющихся на вращающихся электродвигателях БЦН и разветвленная система охлаждения электромагнитных обмоток, позволяет считать, что электрическая часть так же является более долговечной и надежной, и не требует за весь срок службы никакого обслуживания, а наличие системы контроля за нагревом электромагнитных обмоток, и их отключение при перегреве, позволяет считать данную конструкцию и менее пожароопасной, чем применяемые на ВАТ в настоящее время.

Расчет топливоподкачивающего насоса

Максимальная объемная производительность поршневого насоса выражается уравнением:

$$V_{n.n.} = 0,786 \cdot d_n^2 \cdot h_n \cdot \eta_n \cdot 10^{-6} \cdot n_n, \quad (9)$$

где $V_{n.n.}$ – максимальная объемная производительность поршневого насоса, л/мин; d_n и h_n – соответственно диаметр и ход поршня, мм; η – коэффициент подачи (0,75...0,8) (3); n_n – число двойных ходов поршня.

Исходя из опыта конструирования систем питания, топливоподкачивающие насосы должны иметь производительность в 2,2...5 раз большую, чем расход топлива на номинальном режиме. Для дальнейших расчетов принимаем максимальное значение $K_m = 4$.

Удельный эффективный расход топлива дизельными двигателями приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Удельный эффективный расход топлива дизельными двигателями

Марка двигателя	Номинальная мощность N_e , л/с	Удельный эффективный расход топлива, г/кВт ч
ЯМЗ-236	180	175
ЯМЗ-238	240	175
ЯМЗ-240	360	175
ЯМЗ-238Н	300	175
Д-12А	300	170
Д-12-525	525	170

Для дальнейших расчетов принимаем двигатель ЯМЗ-238 мощность 300 л.с. и удельным эффективным расходом топлива 175 г/кВт ч.

Часовой расход топлива определяем по формуле [7]:

$$G_{m.ч.} = N_e \cdot g_e, \quad (10)$$

где $G_{m.ч.}$ – часовой расход топлива двигателя ЯМЗ-238 л/ч; N_e – номинальная мощность двигателя, л.с.; g_e – удельный эффективный расход топлива двигателя ЯМЗ-238, г/кВт ч.

$$G_{m.ч.} = 300 \cdot 175 = 52500 \text{ г/ч}. \quad (11)$$

Для определения максимальной объемной производительности топливоподкачивающего насоса ($V_{n.л.}$) необходимо знать число двойных ходов поршня насоса (n_n). Особенности электромагнитного привода, состоящего из 2-х полюсного (2 сердечника с обмотками) таковы, что цикличность его более 120 двойных ходов в минуту нежелательна, из-за резкого возрастания за этим пределом вредных влияний самоиндукцией, взаимоиндукций и магнитного «гистерезиса» [8, 9].

Для того, чтобы данный насос можно было использовать как многотопливный, необходимо иметь запас регулирования его производительности, не менее 30 % [30]. Отсюда принимаем $n_n = 90$. Отношение h_n к d_n обычно равно (0,8...1,2). Принимаем отношение h_n к d_n равным 1,2, т.е. $h_n = 1,2d_n$.

С целью определения геометрических размеров топливоподкачивающего насоса, приведем размерность $G_{т.ч.}$ с г/ч в л/мин, тогда получим:

$$G_{m.ч.} = 525000 \frac{\text{г}}{\text{ч}} = 61047 \text{ см}^3/\text{ч} = G_m = 1,02 \text{ л/мин}. \quad (12)$$

Учитывая, что подача топливоподкачивающего насоса должна превышать расход топлива двигателем на величину коэффициента $K_{n.л.}$ (в нашем случае $K_{n.л.} = 3,5$), записываем следующее уравнение:

$$G_m \cdot K_{n.л.} = V_{n.л.} \quad (13)$$

подставляя значения, получим:

$$V_{n.л.} = 1,02 \text{ л/мин} \cdot 3,5 = 0,786 \cdot d_n^2 \cdot 1,2d_n \cdot \eta_n \cdot 10^{-6} \cdot 90 \text{ л/мин}. \quad (14)$$

Принимаем коэффициент $\eta_n = 0,75$, отсюда:

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{1,02 \cdot 3,5}{0,786 \cdot 0,75 \cdot 10^{-6} \cdot 90}} \cdot 1,2 = 33,9 \text{ мм}, \quad (15)$$

тогда $h_n = 1,2d_n = 40,7$ мм.

Зная h_n и d_n определяем поверхность поршней (2*) учитывая, что длина поршня должна превышать ход поршня h_n в 2...8 раз [10], что связано с предотвращением перекоса поршня, а в насосах с рассматриваемым приводом и в том, чтобы иметь более оптимальные поверхности при электромагнитном взаимодействии.

Площадь поверхности (цилиндрической) одного поршня S_{n1} , будет равна:

$$S_{n1} = \pi \cdot d_{n1} \cdot l_{n1}, \quad (16)$$

где S_{n1} – площадь поверхности цилиндрической части поршня, мм²; d_{n1} – диаметр поршня, мм; l_{n1} – длина поршня, принятая равной $2h_n$, мм.

$$S_{n1} = 3,14 \cdot 33,9 \cdot 81,4 \text{ мм} = 8665 \text{ мм}^2. \quad (17)$$

Точно такой же будет и поверхность второго поршня $S_{n2} = 8665 \text{ мм}^2$.

Диаметр перемычки между поршнями равен $d_{пер} = 30$ мм, длина перемычки $l_{пер} = 20$ мм, тогда площадь $S_{пер}$ определяется по выражению:

$$S_{пер} = 3,14 \cdot 30 \cdot 20 = 1884 \text{ мм}^2. \quad (18)$$

Объем поршня будет определяться:

$$V_n = V_{n1} + V_{n2} + V_{пер}, \quad (19)$$

где V_n – объем поршня полный, мм³; V_{n1} – объем левого поршня, равный по размерам и объему V_{n2} , мм³; $V_{пер}$ – объем перемычки, мм³.

Учитывая, что все составляющие формулы (19) являются цилиндрическими деталями, то получим:

$$V_n = \frac{\pi d_{n1}^2}{4} \cdot l_1 + \frac{\pi d_{n2}^2}{4} \cdot l_2 + \frac{\pi d_{пер}^2}{4} \cdot l_{пер} = 160996 \text{ мм}^3$$

или 161 см³, в таком случае масса поршня из стали составит:

$$P_n = V_n \cdot \rho_{ст}, \quad (21)$$

где P_n – масса поршня насоса, г; V_n – объем поршня насоса, см³; $\rho_{ст}$ – плотность стали, равная 5,59.

Длина цилиндра насоса будет определяться:

$$L_{ц} = L_n + 2h_n + 2l_{пр}, \quad (22)$$

где $L_{ц}$ – длина цилиндра насоса, мм; L_n – длина поршня насоса, мм; $2h_n$ – ход поршня в обе стороны, мм; $2l_{пр}$ – длина 2-х возвратных пружин в сжатом состоянии, мм.

Подставляя цифровые значения в формулу (14), получим:

$$L_{ц} = 162 + 2 \cdot 40,7 + 2 \cdot 30 = 303,4 \text{ мм}, \quad (23)$$

Толщина стенок цилиндра с учетом расположения в них каналов подвода топлива и охлаждения диаметром 3 мм, должна составлять 8 мм.

Компоновочные габариты электромагнитных обмоток, каждой из 2-х, должны быть в пределах 80x20 мм в сечении (одном) каждой тороидальной обмотки.

Принимаем для электромагнитных обмоток провод марки ПЭП диаметром 0,5 мм [11] и принимая коэффициент намотки $K_n = 1,1$ рассчитываем исходя из предлагаемых габаритов число витков в одной обмотке.

$$n_{обм.} = n_1 \cdot \dots \cdot n_6, \quad (24)$$

где $n_{обм.}$ – число витков в обмотке; n_1 – число витков в горизонтальном ряде; n_6 – число витков в вертикальном ряде, так как ширина обмотки ≈ 80 мм, а высота ≈ 20 мм.

$$n_1 = K_n \cdot d_{провода}, \quad (25)$$

$$n_1 = \frac{80 \text{ мм}}{0,5 \cdot 1,1} = 145 \text{ витков}. \quad (26)$$

$$n_6 = \frac{20}{0,5 \cdot 1,1} = 36 \text{ витков}. \quad (27)$$

Тогда получим: $n_{обм.} = 145 \cdot 36 = 5272 \text{ витка}$.

Минимальным диаметром для обмотки будет наружный диаметр цилиндра насоса, который с учетом толщины стенок будет равен 50 мм. Так как высота обмотки составляет 20 мм и с каждым витком диаметр витка в вертикальной плоскости будет увеличиваться на 0,55 мм, то для упрощения расчетов, при определении длины провода в обмотке, примем средний радиус обмотки, который равен 60 мм, но поскольку намотка осуществляется по спирали, то каждый виток в горизонтальной плоскости будет больше геометрической окружности витка примерно на 1,6 мм. Поэтому длина провода в обмотке составит:

$$L_{обм} = \frac{(\pi d_{cp} + 1,6)n_{обм.}}{1000}, \quad (28)$$

где L – длина провода в обмотке, м; d_{cp} – средний диаметр витка провода в обмотке, мм; $n_{обм.}$ – число витков в обмотке; 1000 – переводный коэффициент.

Подставив значения, получим:

$$L_{обм} = \frac{(3,14 \cdot 60 + 1,6)5272}{1000} = 1002 \text{ м}. \quad (29)$$

Зная длину проводника и его сечение, определим сопротивление обмотки по формуле [29]:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (30)$$

где R – сопротивление обмотки, Ом; l – длина провода в обмотке, м; S – площадь сечения проводника, мм²; ρ – удельное сопротивление, т.е. сопротивление данного проводника длиной 1 м и сечением 1 мм² при температуре 20 °С. Для меди – 0,0175 Ом·мм²/м.

Подставив значения в формулу (22), получим:

$$R = 0,0175 \frac{1002 \text{ м}}{0,196 \text{ мм}^2} = 89,5 \text{ Ом}. \quad (31)$$

Определяем силу тока в обмотке по формуле [29]:

$$J = \frac{V}{R}, \quad (32)$$

где J – сила тока, А; V – напряжение сети, В; R – сопротивление обмотки, Ом.

$$J = \frac{24 \text{ В}}{89,5 \text{ Ом}} = 0,3 \text{ А}. \quad (33)$$

Наибольшая допустимая продолжительная величина тока для медного провода марки ПЭЛ диаметром 0,5 мм – 7,5 А [12].

Сила тока в режиме «разогрев» будет равна:

$$J_{раз.} = J \cdot 2 = 0,6 \text{ A.} \quad (34)$$

Мощность, потребляемая электромагнитной обмоткой, будет равна:

$$P = \frac{J \cdot V \cdot t}{t} = V \cdot J, \quad (35)$$

где P – мощность электромагнита, Вт; V – напряжение сети, В; J – сила тока, А.

$$P = 24 \cdot 0,3 = 7,2 \text{ Вт.} \quad (36)$$

Мощность в режиме «Разогрев» в два раза выше – 14,4 Вт. Тепловое действие тока (закон Джоуля-Ленца) [10, 11].

$$Q = 0,24 \cdot J^2 \cdot R \cdot t, \quad (37)$$

где Q – количество тепла, выделяемого обмоткой, при прохождении по ней тока Кал; 0,24 – термический эквивалент; J – сила тока в обмотке, Вт; R – сопротивление обмотки, Ом; t – время прохождения тока, с.

Время прохождения тока определяем исходя из числа двойных ходов в минуту, $n_{it} = 90$ в минуту, отсюда $t = \frac{60}{90} = 0,7 \text{ с.}$

$$Q = 0,24 \cdot (24)^2 \cdot 89,5 \cdot 0,7 = 8661 \text{ Кал.} \quad (38)$$

Данное количество тепла получается за один ход поршня. За оба – 17322 Кал. Дополнительное выделение тепла образуется за счет явления магнитного «гистерезиса».

Напряженность магнитного поля замкнутого соленоида определяется по формуле:

$$H = \frac{J \cdot W}{l}, \quad (39)$$

где H – напряженность магнитного поля, А/м; J – сила тока, А; W – число витков соленоида; l – длина средней магнитной силовой линии поля соленоида, м.

Принципиальная схема работы соленоида представлена на рисунке 3.

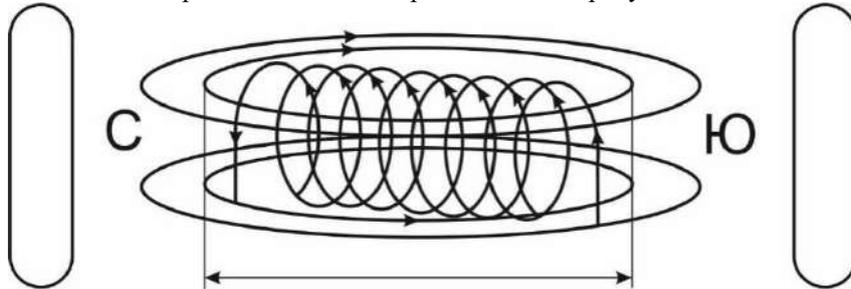


Рисунок 3 – Внешний вид магнитных полей соленоида

Так как длина обмотки равна 80 мм, то учитывая особенности конструкции электромагнитных обмоток и материалы применимые при изготовлении топливоподкачивающего насоса $l \approx 0,1 \text{ м.}$

Подставив значения в формулу, получим:

$$H = \frac{0,3 \cdot 5272}{0,1} = 15816 \text{ А/м.} \quad (40)$$

Магнитная индукция представляет собой силу результирующего магнитного поля, которое действует на «единичный» полюс в какой-либо точке поля и определяется по формуле:

$$B = \mu \cdot H, \quad (41)$$

где B – магнитная индукция, Гаусс; μ – коэффициент магнитной проницаемости среды, для меди равной 0,999991; H – напряженность магнитного поля, А/м:

$$B = 0,999991 \cdot 15816 = 15815,8 \text{ Гаусса.} \quad (42)$$

Электромагниты характеризуются так же и подъемной силой, т.е. силой, с которой они удерживают притянутый к сердечнику якорь. Подъемная сила электромагнита определяется по формуле [11]:

$$F = \frac{B^2 \cdot S \cdot 10^7}{8 \cdot \pi}, \quad (43)$$

где F – подъемная сила, Н; B – магнитная индукция в сердечнике, всек/м²; S – площадь прилипания (или касания) якоря (поршня) к сердечнику, м², для поршня это поверхность цилиндра.

Подставив значения, получим:

$$F = \frac{158158^2 \cdot 865}{8 \cdot 3,14} = 86,29 \cdot 10^6 \text{ Н.} \quad (44)$$

Расчет теплопроводности установочного корпуса топливоподкачивающего насоса.

Теплопередача путем теплопроводности в электрических машинах происходит главным образом внутри твердых тел (медь, сталь, изоляция), в то время как в газах и жидкостях – конвекцией. Для расчета используем формулу [12]:

$$Q = \frac{\lambda_{пр} \cdot S}{\delta \cdot (v_1 - v_2)}, \quad (45)$$

где Q – теплопроводность, Вт; δ – расстояние между поверхностями обмоток и корпуса, м; $\delta \approx 0,0005$ м; $\lambda_{пр}$ – коэффициент теплопроводности, Вт/с·м; для стали $\lambda_{пр} = 20-45$ Вт/с·м; $(v_1 - v_2)$ – разность температур между поверхностью обмотки и корпуса насоса, $^{\circ}\text{C}$.

Для данных обмоток $(v_1 - v_2) = 10$ $^{\circ}\text{C}$ [30].

$$Q = \frac{30 \text{ Вт/(с·м)} \cdot 0,026 \text{ м}^2}{0,0005 \text{ м}} \cdot 10 \text{ }^{\circ}\text{C} = 15600 \text{ Вт.} \quad (46)$$

Это значительно выше потребляемой насосом мощности (14,4 Вт) и позволяет сделать вывод – корпус имеет большой запас по теплопроводности.

Расчет массы топливоподкачивающего насоса.

Масса установочного корпуса.

Массу цилиндрической части определяем по формуле:

$$m_{ц.ч.} = \pi d^2 l \cdot m_{ст}, \quad (47)$$

где $m_{ц.ч.}$ – плотность стали, г; $m_{ц.ч.} = 1599$ г.

Масса фланца установочного корпуса $m_{ф.у.к.}$, определяем аналогично и составит $m_{ф.у.к.} = 1841$ г.

Масса патрубка установочного корпуса:

$$m_{п.у.к.} = 200 \text{ см}^2 \cdot 5,59 \text{ г/см}^3 = 1118 \text{ г.} \quad (48)$$

Масса ребер охлаждения установочного корпуса (12 шт.) будет составлять $m_{реб.} = 2471$ г.

Масса установочного корпуса $M_{у.к.}$ составит:

$$M_{у.к.} = m_{ц.ч.} + m_{ф.у.к.} + m_{п.у.к.} + m_{реб.}, \quad (49)$$

$$M_{у.к.} = 1599 + 1841 + 1118 + 2471 = 7029 \text{ г.} \quad (50)$$

Масса цилиндра топливоподкачивающего насоса составит $M_{ц} = 1378$ г.

Затем осуществлялось изготовление топливоподкачивающего насоса и экспериментальные исследования по определению эксплуатационных показателей дизельного двигателя ЯМЗ-238 установленного на нагрузочном стенде КИ-5540, представленном на рисунке 4. Для снятия показателей дизельного двигателя ЯМЗ-238НЕ и получения внешней скоростной характеристики использовали нагрузочный центр КИ-5540 (рисунок 4).



Рисунок 4 – Внешний вид нагрузочного стенда КИ-5540 и испытуемого дизельного двигателя для проведения экспериментальных исследований

Как показали результаты проведенных исследований, при эксплуатации двигателя ЯМЗ-238 с модернизированной системой питания на основе установки разработанного

топливоподкачивающего насоса, возможно, подогреть штатное дизельное топливо до температуры 50...60 °С, что позволяет повысить эксплуатационные показатели двигателя. При работе двигателя в условиях низких температур на топливе, которое предварительно подогрето до 50...60 °С, получено повышение мощности на 5...7%, снижение удельного эффективного расхода топлива до 10%, а также снижение количества токсичных веществ в 1,5 раза.

Заключение. Таким образом, при работе топливоподкачивающего насоса и предпускового подогревателя во избежание ненужных потерь тепла с помощью топливо распределительного крана РК, показанного на рисунке 2, топливо подается только к подогревателю, а в случае повышения давления с помощью редукционного клапана КР, топливо подается обратно в бак для подогрева. Перед запуском двигателя отключается подача топлива к подогревателю, но подключается штатная система питания двигателя.

Предлагаемая конструкция топливоподкачивающего насоса легко поддается процессам автоматизации в области изменения температуры нагрева и изменения его производительности, а также отключения в случае возникновения нештатных ситуаций. Для этих целей в кабине автомобиля устанавливается пульт управления в любом удобном месте в зависимости от марки автомобиля, что, следовательно, будет способствовать снижению утомляемости водителя, экономить топливо, что в конечном итоге повысит среднесуточные пробеги машин [12].

Внедрение предлагаемого технического решения в системе питания дизельной автомобильной техники в условиях ее эксплуатации в условиях низких температур (крайнего севера и др.), позволит подогреть все дизельное топливо, залитое в бак автомобиля, тем самым исключить возможность его кристаллизации и помутнения и в целом снизит количество отказов автомобильной техники, связанных с этой проблемой и в целом повысит эксплуатационные показатели дизельных ДВС.

Список источников

1. Орлина А.С., Круглова М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. М.: Машиностроение, 1999. 432 с.
2. Никитин М.Д., Кулик А.Н. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизелей – Л.: Машиностроение, 1977.
3. Шапран В.Н., Картуков А.Г., Березняк А.В. Разогрев топлива в системе низкого давления дизелей. Рязань: РВАИ. 2005. 8 с.
4. Крамаренко Г.В., Николаев В.А., Шаталов А.И. Безгаражное хранение автомобилей при низких температурах – М.: Транспорт, 1984.
5. Ишков А.М. Теория и практика надежность техники в условиях Севера [Текст] учебник / А.М. Ишков, М.А. Кузьминов, Г.Ю. Зуров Якутск ЯФГУ. Изд. СО РАН. 2004. 313 с.
6. Способ продления ресурса военной автомобильной ВАТ при повседневной эксплуатации / А.Е. Ломовских, Е.В. Носов, С.В. Митрофанова. Электронное периодическое издание «Воздушно-космические силы. Теория и практика». Издательство: ФГКВОУ ВО ВУНЦ ВВС «ВВА» имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. МО РФ (Воронеж) 2020 г. №13. С. 165–174.
7. Буралев Ю.В., Мартиров О.А. и др. Устройство, обслуживание и ремонт топливной аппаратуры автомобилей – М.: Высшая школа, 1978. 268 с.
8. Мацкерие Ю.С. Современные экономические автомобили – М.: Машиностроение, 1987.
9. Иванов В.Н. Экономия топлива на автомобильном транспорте – М.: Транспорт, 1984.
10. Основные термины и определения У.П., РВВАИУ, 1990. 186 с.
11. Повышение экологичности и экономичности автомобильной техники / А.А. Свиридов, Ю.В. Родионов, С.И. Данилин, А.О. Сухова. Журнал «Вопросы современной науки и практики». Университет им. В.И. Вернадского. № 1(87). 2023. № 2 (62). С. 30–42.

References

1. Orlina A.S., Kruglova M.G. Internal combustion engines. The design and operation of reciprocating and combined engines. Moscow: Mashinostroenie, 1999. 432 p.
2. Nikitin M.D., Kulik A.N. Heat-protective and wear-resistant coatings of diesel engine parts - L.: Mechanical Engineering, 1977.

3. Shapran V.N., Kartukov A.G., Bereznyak A.V. Heating of fuel in a low-pressure diesel engine system. Ryazan: RVAI. 2005. 8 p
4. Kramarenko G.V., Nikolaev V.A., Shatalov A.I. Garage-free storage of cars at low temperatures – M.: Transport, 1984.
5. Ishkov A.M. Theory and practice of reliability of technology in the conditions of the North [Text] textbook / A.M. Ishkov, M.A. Kuzminov, G.Yu. Zurov Yakutsk YAFSU. Ed. SB RAS. 2004. 313 p.
6. A method for extending the life of military automotive cotton wool during daily operation / A.E. Lomovskikh, E.V. Nosov, S.V. Mitrofanova. Electronic periodical "Aerospace Forces. Theory and practice". Publishing house: FGKVOU IN the VUNTS of the Air Force "VVA" named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin. Ministry of Defense of the Russian Federation (Voronezh) 2020 No. 13. pp. 165-174.
7. Buralev Yu.V., Martirov O.A. and others. Device, maintenance and repair of fuel equipment of cars – M.: Higher School, 1978. 268 p
9. Matskerie Yu.S. Modern economic cars – M.: Mechanical engineering, 1987.
10. Ivanov V.N. Fuel economy in motor transport – M.: Transport, 1984.
11. Basic terms and definitions U.P., RVVAIU, 1990. 186 p.
12. Improving the environmental friendliness and efficiency of automotive equipment / A.A. Sviridov, Yu.V. Rodionov, S.I. Danilin, A.O. Sukhova. The journal "Issues of modern science and Practice". V.I. Vernadsky University. № 1(87). 2023. № 2 (62). Pp. 30-42.

Информация об авторах

Ю.В. Родионов – доктор технических наук, профессор, А.А. Баглаев – кандидат технических наук, А.А. Свиридов – кандидат педагогических наук, А.В. Север – соискатель, И.Г. Хохлов – курсант, В.Г. Кубасов – магистр.

Information about the authors

Yu. Rodionov – Doctor of Technical Sciences, Professor, A. Baglaev – Candidate of Technical Sciences, A. Sviridov – Candidate of Pedagogical Sciences, A. Sever – applicant, I. Khokhlov - cadet, V. Kubasov – past master.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 02.04.2024 Принята к публикации (Accepted): 24.04.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.171
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-47-54

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СХЕМ ПЛАВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ГАЗОГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА

*Анатолий Михайлович Шувалов*¹, *Алексей Николаевич Машков*²,
*Дмитрий Анатольевич Тихомиров*³

^{1,2} *Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Российская Федерация*

¹ *vniitin@mail.ru*

³ *Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Российская Федерация*

³ *Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К.И. Скрябина, г. Москва, Российская Федерация*

³ *tihda@mail.ru*

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Михайлович Шувалов, *vniitin@mail.ru*
Corresponding author: Anatoliy Shuvalov, *vniitin@mail.ru*

Реферат. Широкомасштабная газификация сельхозпредприятий, личных подсобных и фермерских хозяйств, для которых наиболее энергоёмкими процессами являются приготовление кормов, пищи, отопление домов, выявила необходимость автоматизации варочных котлов. Особенность работы варочных котлов связана с тем, что по мере нагрева содержимого варочной емкости до температуры кипения расход тепла уменьшается, а при закипании продукта расход тепла падает ниже 10%. Установлено, что отсутствие автоматической регулировки газа приводит к избыточному выделению тепла в атмосферу при сгорании газообразного топлива. Ранее был разработан газогорелочный блок на основе частично автоматического промышленно выпускаемого газогорелочного устройства типа АГУ-Т-М для варочных котлов, позволяющий регулировать расход газа пропорционально потребляемому тепловому потоку. Была поставлена задача разработать перспективную схему, которая позволит регулировать расход газа в варочном котле пропорционально потребляемому тепловому потоку. В данной статье приведено описание двух вариантов схем пропорционального регулирования расхода газа в варочном котле: первая – это усовершенствованная схема на базе автоматизированного газогорелочного устройства типа АГУ-Т-М; вторая – схема, разработанная на базе полупроводниковых модулей Пельтье, регулирующего соленоида с подвижкой. Дается оценка с указанием преимуществ и недостатков этих схем. Показано, что первая схема работоспособна и энергонезависима, её применение наиболее эффективно в отдалённых населенных пунктах, где наблюдаются частые перерывы в централизованном электроснабжении. Вторая схема соответствует последним достижениям научно-технического прогресса.

Ключевые слова: пропорциональное регулирование, газ, варочный котёл, потребляемый тепловой поток, теплота, полупроводниковые модули Пельтье.

COMPARATIVE EVALUATION OF SMOOTH POWER CONTROL SCHEME OF GAS BURNER DEVICE

*Anatoliy Shuvalov*¹, *Alexey Mashkov*², *Dmitriy Tikhomirov*³

^{1,2} *All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, Tambov, Russian Federation*

¹ *vniitin@mail.ru*

³ *Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation*

³Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology – MVA named after K.I. Skryabin, Moscow, Russian Federation
³tihda@mail.ru

Abstract. Large-scale gasification of agricultural enterprises, personal subsidiary plots and farms, for which the most energy-intensive processes are the preparation of feed, food, and home heating, has revealed the need to automate digesters. The peculiarity of the operation of digesters is due to the fact that as the contents of the cooking container are heated to boiling temperature, the heat consumption decreases, and when the product boils, the heat consumption drops below 10%. It has been established that the lack of automatic gas control leads to excessive heat release into the atmosphere during the combustion of gaseous fuel. Previously, a gas burner unit was developed based on a partially automatic industrially produced gas burner device of the AGU-T-M type for digesters, which makes it possible to regulate gas flow in proportion to the consumed heat flow. The task was set to develop a promising scheme that would make it possible to regulate the gas flow in the digester in proportion to the consumed heat flow. This article describes two variants of schemes for proportional control of gas flow in a digester: the first is an improved scheme based on an automated gas burner device of the AGU-T-M type; the second is a circuit developed on the basis of Peltier semiconductor modules, a control solenoid with a gate valve. An assessment is given indicating the advantages and disadvantages of these schemes. It is shown that the first scheme is efficient and energy-independent; its use is most effective in remote settlements where there are frequent interruptions in the centralized power supply. The second scheme corresponds to the latest achievements of scientific and technological progress.

Keywords: proportional control, gas, digester, consumed heat flow, heat, Peltier semiconductor modules.

Для цитирования: Шувалов А.М., Машков А.Н., Тихомиров Д.А. Сравнительная оценка схем плавного регулирования мощности газогорелочного устройства // Наука в Центральной России. 2024. Т. 68, № 2. С. 47-54. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-47-54>.

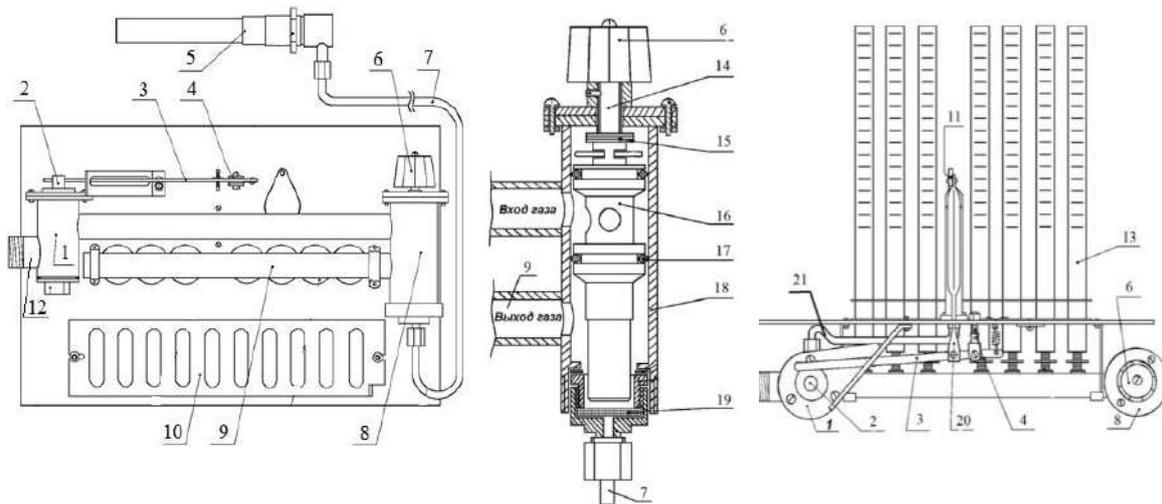
For citation: Shuvalov A., Mashkov A., Tikhomirov D. Comparative evaluation of smooth power control scheme of gas burner device. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 68(2): 47-54. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-47-54>.

Введение. В серийно выпускаемых газоиспользующих варочных котлах предусмотрено ручное или двухступенчатое регулирование подачи газа [1]. В этом случае нельзя угадать подано теплоты много или мало. Если много подается газа, то перерасход теплоты, мало — увеличивается время разогрева. Если предусмотреть регулирование подачи газа пропорционально потребляемому тепловому потоку на разогрев продукции или воды (в дальнейшем содержимого), то эти недостатки исключаются [2].

Информационно-патентные исследования показали, что с учетом последних достижений науки и техники из существующих разработок можно извлечь множество автоматизированных средств для выполнения функций розжига, контроля пламени, продувки дымохода и обеспечения безопасности газовых горелок [3]. В то же время следует отметить, что пока не найдено новых, простых и совершенных решений автоматизации для регулирования теплового потока, потребляемого в варочном котле, пропорционально изменению температурного напора.

В связи с этим поставлена задача разработать простую, надежную и эффективную систему энергообеспечения варочного котла, способную пропорционально регулировать газовый поток.

Материалы методы исследований. В качестве основы для разработки котлов автоматического газоснабжения, реализующих принцип регулирования расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку, нами принято частично автоматическое газогорелочное устройство типа АГУ-Т-М, которое используется для отопительных котлов малой мощности и постоянно выпускается на заводе "МИМАКС". После частичной доработки АГУ-Т-М был разработан газогорелочный блок для варочных котлов [4-5], позволяющий регулировать расход газа пропорционально потребляемому тепловому потоку (рисунок 1).



1 – газовый клапан, 2 – кнопка газового клапана, 3 – рычаг, 4 – регулировочный винт,
 5 – термобаллон,
 6 – ручка управления, 7 – термодатчик, 8 – блок-кран, 9 – газораспределитель, 10 – воздушная заслонка, 11 – запальник, 12 – питающий газовый патрубок, 13 – основная горелка, 14 – винт, 15 – регулировочные шайбы, 16 – снаряд, 17 – уплотнительные резинки, 18 – корпус, 19 – мембрана термодатчика, 20 – термопластина запальника, 21 – газовый патрубок.

Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема плавного регулирования расхода газа с использованием реконструированного устройства АГУ-Т-М.

Система энергообеспечения, показанная на рисунке 1 работает следующим образом. Чтобы включить газовую горелку, нажимаем кнопку на газовом клапане. В этот момент газ из патрубка поступает в систему розжига через газовый клапан и газовый патрубок. Одновременно газ из газовой магистрали проходит через блок-кран. Перемещая регулировочный винт на блокирующем клапане с помощью ручки управления, газ проходит через газораспределитель основной горелки и поджигается запальником. На внутренней стенке варочной емкости находится термобаллон, заполненный технологической жидкостью. Когда температура внутри варочной емкости повышается, жидкость в термобаллоне расширяется, увеличивается в объеме и оказывает давление на мембрану через соединительную трубку, соединяющую термобаллон с блок-краном. В этом случае мембрана перемещается вверх, зазор уменьшается, скорость потока газа снижается пропорционально повышению температуры содержимого емкости для приготовления пищи, и зазор полностью закрывается. Если температура продукта снижается, например, если в варочный сосуд добавляется холодная вода или замороженное мясо, температура рабочей жидкости в термобаллоне снижается, давление в мембране уменьшается, мембрана смещается вниз, зазор увеличивается, и скорость потока газа в горелке, таким образом, увеличивается. Расход газа автоматически регулируется в зависимости от температуры в емкости для приготовления пищи.

Конструктивно – технологическая схема и вместе с ней само газогорелочное устройство АГУ-Т-М имеет следующие достоинства:

- может обеспечиваться работа котла без наличия электрической сети, так как конструкция газового клапана 1, кнопки газового клапана 2, рычага 3 и термопластина запальника 20 являются механическими частями и не требуют наличия датчиков контроля пламени, электродов розжига, электронных блоков управления.

- Расход газа может автоматически регулироваться в зависимости от потребляемого теплового потока.

Недостатки данного конструктивно-технического подхода заключаются в следующем:

- розжиг газогорелочного устройства осуществляется вручную.

- возможна аварийная ситуация утечки газа при поломке рычажных сочленений, что снижает надёжность работы.

Для устранения указанных недостатков в результате натурных испытаний было выявлено, что работоспособную, полностью автоматизированную и перспективную схему пропорционального регулирования расхода газа в варочном котле можно выполнить на базе полупроводниковых термоэлементов Пельтье [6, 7].

Известно, что термопары на основе полупроводниковых материалов используются в широком спектре по всему миру для измерения температуры в различных средах, а также в автоматических схемах для теплотехнических изделий.

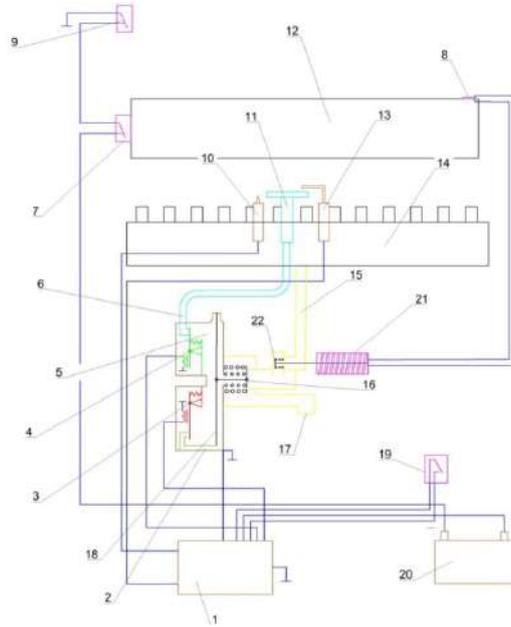
Однако из-за крайне низких значений тока термопары не подходят для управления потоком газа с помощью приводов прямого действия. В настоящее время доступны относительно недорогие и компактные модули с большим количеством полупроводниковых термопар: модуль типа TEC1-12706 содержит 127 термопар (рисунок 2). Они производятся в основном в Китае и частично в России [6].



Рисунок 2 – Термоэлектрические модули

Благодаря использованию этих модулей для выработки электроэнергии, а не тепла и холода, было разработано системное решение, которое регулирует поток газа пропорционально количеству тепла, потребляемого в газоиспользующем котле (рисунок 3). В этом случае модули электрически соединены друг с другом, образуя термоэлектрическую батарею. Разница температур между внутренней и внешней стенками каждого термоэлектрического модуля генерирует электрический сигнал, величина которого изменяется пропорционально температуре и давлению (разнице температур между паром и содержимым варочной емкости).

Таким образом, получается полностью автоматизированная система энергоснабжения варочного котла, энергетически независимая от центральной системы энергоснабжения, с пропорциональным потреблением газа и использованием нетрадиционных источников энергии (рисунок 3). Таким образом, варочный котел продолжает работать независимо от аварийных или периодических отключений центральной системы энергоснабжения.



1 – блок управления; 2 – газовый канал в замембранную область к управляющим клапанам; 3 – управляющий газовый клапан; 4 – управляющий газовый клапан к запальной горелке; 5 – замембранная область; 6 – газовый патрубок к запальной горелке; 7 – датчик перегрева воды; 8 - термоэлектрический элемент; 9 – датчик контроля тяги; 10 – электрод розжига; 11 – запальная горелка; 12 – теплообменник газ-жидкость; 13 – датчик контроля наличия пламени; 14 – основная горелка; 15 – газовый патрубок к основной горелке; 16 – газовый клапан к основной горелке; 17 – питающий газовый патрубок; 18 – эластичная мембрана; 19 – микровыключатель; 20 – аккумулятор; 21 – соленоид управляющего клапана; 22 – задвижка.

Рисунок 3 – Схема автоматизированного газогорелочного устройства с пропорциональным регулированием расхода газа.

Для подтверждения пропорциональности изменения напряжения на выходе полупроводниковых модулей от разности температуры был проведен опыт в лабораторных условиях. Результаты экспериментов представлены на графике (рисунок 4).

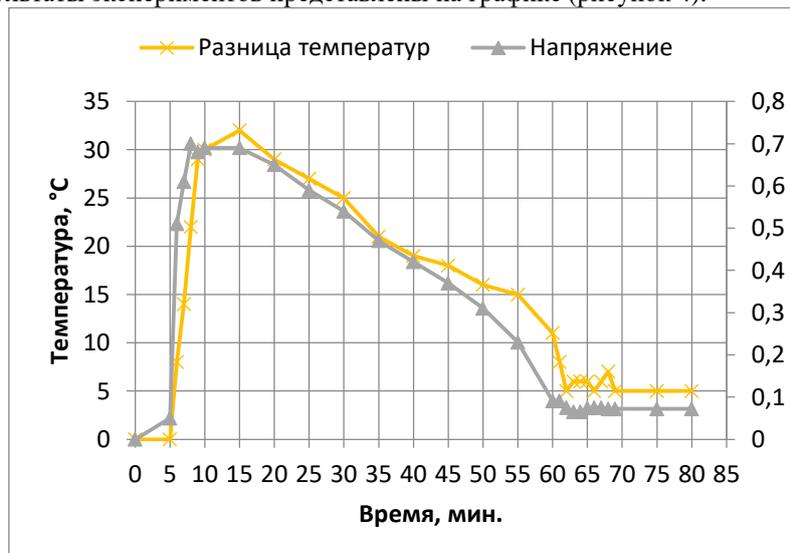


Рисунок 4 – Взаимосвязь напряжения модуля Пельтье и температуры на его поверхности.

Как видно из графика (рисунок 4), эта зависимость пропорциональна, поэтому разработка и применение системы энергообеспечения варочного котла с пропорциональным регулированием расхода газа вполне оправдана.

Особенностью системы является то, что термоэлектрический элемент, электромагнитный управляющий клапан и задвижка расположены между газовым клапаном и газовым патрубком основной горелки в корпусе газового блока.

Последовательность работы схемы (рис. 4) следующая. Вначале газ из патрубка подачи газа свободно проходит через газовый патрубок и нормально открытый регулирующий клапан в мембранную область регулирующего клапана. Газовый клапан основной горелки закрыт. Напряжение термоэлектрического элемента не подается на соленоид управляющего клапана, а задвижка, соединенная с ним металлическим штоком, находится в открытом положении под действием пружины. Когда микровыключатель активирован, газовая горелка запускается. Когда микровыключатель активирован и удерживается в закрытом положении, напряжение от батареи подается на блок управления, датчик перегрева и датчик вентиляции. Если датчики выключены и датчик пламени не подает напряжение на блок управления, блок управления подает напряжение на газовый клапан запальной горелки, клапан открывается, и газ поступает в запальную горелку. В то же время блок управления подает импульсное высокое напряжение на запальный электрод. Газ поступает в запальную горелку через газовый клапан, и газоздушная смесь воспламеняется. Блок управления обнаруживает, что произошло воспламенение, поскольку датчик пламени нагревается и подает напряжение на блок управления. Затем блок управления активирует нормально открытый газовый клапан и закрывает его. Клапан управления подачей газа к запальной горелке открывается, и весь газ, оставшийся в герметичной зоне, выходит и сгорает через газовый патрубок к запальной горелке. В этот момент давление в герметичной зоне падает ниже давления газа в патрубке подачи газа. Эта разница давлений заставляет газовый клапан основной горелки открыться, и газ поступает в основную горелку. Когда газ в герметичной зоне исчерпан, запальная горелка отключается, и блок управления отсоединяет газовый клапан запальной горелки. Газовый клапан основной горелки остается открытым в максимальном положении. Во время работы основная горелка нагревает как газожидкостный теплообменник, так и термоэлектрический элемент, установленный на его поверхности. За счет разницы температур между верхней и нижней поверхностями термоэлектрического элемента на его выходных контактах возникает напряжение; чем больше разница температур, тем выше уровень напряжения между контактами. Термоэлектрический элемент соединен проводом с электромагнитной катушкой управляющего клапана. Когда напряжение между контактами соленоида управляющего клапана изменяется, его сердечник (он же шток задвижки) начинает двигаться, преодолевая сопротивление пружины и закрывая задвижку. Зазор между задвижкой и газовым патрубком уменьшается. Разница температур между верхней и нижней поверхностями термоэлектрического элемента больше не увеличивается, движение управляющего клапана и штока электромагнитного клапана задвижки прекращается, и поток газа фиксируется в постоянном положении. При увеличении или уменьшении разности температур положение задвижки и поток газа изменяются пропорционально разности температур. Физические параметры задвижки, пружины и электромагнитного клапана подбираются таким образом, чтобы разница температур между верхней и нижней поверхностями термоэлектрического элемента соответствовала напряжению на электромагнитном клапане управления, когда нагретый продукт достигает температуры кипения. Зазор между задвижкой и газовым патрубком основной горелки минимизируется таким образом, чтобы через него проходило достаточное количество газа для обеспечения спокойного кипения продуктов в варочной емкости. Если срабатывает датчик вентиляции, датчик перегрева или микровыключатель, блок управления обесточивается, и регулирующий клапан возвращается в свое нормальное состояние (открытое или закрытое). В этом случае, как и в исходном положении, газ заполняет закрытое пространство, давление в закрытом пространстве и в линии подачи газа выравнивается, и газовый клапан основной горелки закрывается под действием силы пружины двухходового клапана. При такой схеме блок управления и газовый клапан выполняют функции розжига и безопасности. Функция управления потоком газа осуществляется исключительно

системой термоэлектрический элемент - электромагнитный клапан управления - задвижка. Преимуществами данной конструктивно-технологической схемы являются:

- в разработанной схеме отсутствует промежуточный усилитель сигнала. Это означает, что тепловой элемент на основе полупроводникового термоэлектрического модуля обеспечивает достаточное количество энергии без промежуточного звена для непосредственного управления регулирующим газовым клапаном. Это также повышает эксплуатационную надежность.

- отсутствие дополнительного расхода газа запальной горелкой;
- экономия газа за счет пропорционального регулирования
- увеличение надежности в результате применения термоэлектрических элементов, так как они не имеют движущихся частей.

Выводы.

1. Конструктивно-технологическая схема, выполненная на базе автоматизированного газогорелочного устройства АГУ-Т-М работоспособная, энергонезависимая. Её применение эффективно в большей степени в отдалённых населенных пунктах, где наблюдаются частые перемены в централизованном электроснабжении.

2. Автоматизированная система энергообеспечения варочного котла, выполненная на базе полупроводниковых нагревательных модулей Пельтье, соответствует последним достижениям научно-технического прогресса по обеспечению пропорционального регулирования расхода газа.

Список источников

1. Антуфьев, В.Т. Концепция совершенствования газовых пищеварочных котлов / В.Т. Антуфьев, М.А. Амосова // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищеварочных производств», 2007.

2. studwood.ru/1836286/tovarovedenie/opisanie_avtomatiki_bezopasnosti_regulirovaniya

3. Литвина Л.С. Фролова З.С. Тепловое оборудование общественного питания. – М.: Экономика, 1987. – 272 с.

4. Патент на изобретение. №2802383 РФ. СПК А47J 27/06. Котёл кормоварочный /Шувалов А.М., Машков А.Н., Чернов Д.С.; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВНИИТиН. Опубл. 04.09.2023. Бюл. №34.

5. Шувалов А.М., Машков А.Н., Тихомиров Д.А. Анализ теплоэнергетических процессов в системе энергообеспечения газоиспользующего кормоварочного котла // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67. № 1 (38). - С. 71-77

6. Трунов С.С., Тихомиров Д.А. Термоэлектрическое осушение воздуха в сельскохозяйственных помещениях // Наука в центральной России. - 2018. -№2 (32). - С. 51-59.

7. В.Н. Белозерцев, С.О Некрасова, Д.В. Сармин, Д.А.Угланов. Определение основных характеристик термоэлектрического генератора: учебное пособие. –Самара: изд-во СГАУ, 2015. - 88с.

References

1. Antufiev, V.T. The concept of improving gas digester boilers / V.T. Antufiev, M.A. Amosova // Scientific journal of NRU ITMO. Series "Processes and apparatus of digestive production", 2007.

2. studwood.ru/1836286/tovarovedenie/opisanie_avtomatiki_bezopasnosti_regulirovaniya

3. Litvina L.S. Frolova Z.S. Thermal equipment for public catering. – M.: Economics, 1987. – 272 p.

4. Patent for an invention. No. 2802383 RF. SPK A47J 27/06. Feed boiler / Shuvalov A.M., Mashkov A.N., Chernov D.S.; applicant and patent holder FGBNU VNIITiN. Publ. 09/04/2023. Bull. No. 34.

5. Shuvalov A.M., Mashkov A.N., Tikhomirov D.A. Analysis of heat and power processes in the energy supply system of a gas-using feed boiler // Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex. 2020. T. 67. No. 1 (38). - pp. 71-77

6. Trunov S.S., Tikhomirov D.A. Thermoelectric dehumidification of air in agricultural premises // Science in Central Russia. - 2018. -№2 (32). - pp. 51-59.

7. V.N. Belozertsev, S.O Nekrasova, D.V. Sarmin, D.A. Uglanov. Determination of the main characteristics of a thermoelectric generator: a tutorial. –Samara: SSAU publishing house, 2015. -88 p.

Информация об авторах

А.М. Шувалов - доктор технических наук, профессор; А. Н. Машков - кандидат технических наук; Д.А. Тихомиров – доктор технических наук, член-корреспондент РАН.

Information about the authors

A.Shuvalov – Full Doctor of technical sciences, Professor; A. Mashkov - Candidate of Technical Sciences; D. Tikhomirov – Full Doctor of technical sciences, corresponding member of RAS.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 01.04.2024 Принята к публикации (Accepted): 23.04.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.171
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-55-60

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ВАРОЧНОГО КОТЛА С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ РАСХОДА ГАЗА

*Анатолий Михайлович Шувалов*¹, *Алексей Николаевич Машков*²,
^{1,2} *Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и
нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Российская Федерация*
¹ vniitin@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Михайлович Шувалов, vniiti@mail.ru
Corresponding author: Anatoliy Shuvalov, vniitin@mail.ru

Реферат. До недавнего времени отопление сельских домов осуществлялось каменным углем или дровами. Корм животным и пищу готовили на электрических плитах или на газовых плитах с газобаллонным топливом. Это трудоёмкие и энергозатратные технологии. Интенсивно развивающаяся газификация села позволяет повсеместно переводить отопление сельских домов и приготовление кормов и пищи на природный газ. В представленной работе основным оценочным показателем варочного котла принят коэффициент полезного действия. Приведены уравнения, описывающие полезный расход энергии на приготовление продукта в варочном котле, а также потери теплоты на нагрев металлоконструкций, на компенсацию потерь энергии от кожуха котла, на продувку паровой рубашки, потери энергии с уходящими газами. Определён расход энергии на единицу продукции при загрузке котла от 100 до 20 л. Выявлено, что КПД котла уменьшается почти в 2 раза, если вместо 100 л загружать варочную ёмкость всего лишь на 20 л. По экспериментальным данным определена полезная составляющая энергии, расходуемой на нагрев до кипения 100 л воды и определён КПД котла в автоматическом и в ручном режиме, который составил: в автоматическом режиме $KPD_a=0,84$, в ручном $KPD_p=0,7$. С учетом экспериментальных данных определены общий расход газа на полный цикл приготовления корма в автоматическом и ручном режиме. Определены годовые эксплуатационные затраты от сжигания газа в варочном котле в автоматическом и ручном режиме и экономию затрат на энергообеспечение процесса приготовления корма.

Ключевые слова: газ, варочный котёл, энергия, коэффициент полезного действия, уровень загрузки, потери теплоты, эксплуатационные затраты.

ECONOMIC EFFICIENCY OF THE ENERGY SUPPLY SYSTEM OF A COOKER WITH PROPORTIONAL GAS FLOW CONTROL

*Anatoliy Shuvalov*¹, *Alexey Mashkov*²
^{1,2} *All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture,
Tambov, Russian Federation*
¹ vniitin@mail.ru

Abstract. Until recently, heating of rural houses was carried out with coal or wood. Animal feed and food were prepared on electric stoves or on gas stoves with gas cylinder fuel. These are labor-intensive and energy-consuming technologies. The intensively developing gasification of rural areas makes it possible to universally transfer the heating of rural houses and the preparation of feed and food to natural gas. In the presented work, the main evaluation indicator of the digester is the efficiency factor. Equations are given that describe the useful energy consumption for preparing the product in a digester, as well as heat losses for heating metal structures, for compensating for energy losses from the boiler casing, for purging the steam jacket, and energy losses with flue gases. The energy consumption per unit of production was determined when loading the boiler from 100 to 20 liters. It has been revealed that the

efficiency of the boiler decreases by almost 2 times if, instead of 100 liters, the cooking tank is loaded with only 20 liters. Based on experimental data, the useful component of the energy spent on heating 100 liters of water to a boil was determined and the boiler efficiency in automatic and manual mode was determined, which was: in automatic mode, efficiency = 0.84, in manual mode, efficiency = 0.7. Taking into account experimental data, the total gas consumption for the full cycle of feed preparation in automatic and manual modes was determined. The annual operating costs from burning gas in a digester in automatic and manual modes and cost savings on energy supply for the feed preparation process were determined.

Keywords: gas, digester, energy, efficiency, load level, heat loss, operating costs.

Для цитирования: Шувалов А.М., Машков А.Н. Экономическая эффективность системы энергообеспечения варочного котла с пропорциональным регулированием расхода газа // Наука в Центральной России. 2024. Т. 68, № 2. С. 55-60. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-55-60>.

For citation: Shuvalov A., Mashkov A. Economic efficiency of the energy supply system of a cooker with proportional gas flow control. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 68(2): 55-60. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-55-60>.

Введение. Почти каждый домовладелец в сельской местности имеет личное подсобное хозяйство (ЛПХ) и значительная доля природного газа тратится не только на отопление, но и на приготовление пищи и кормов для животных и птицы. Для этого используются в основном газовые плиты. Практика показывает, что в крупных ЛПХ, где выращиваются 3-5 голов свиней, 2-3 коровы, 15-20 кур выгодно готовить корм не на газовых плитах, а в варочных газоиспользующих котлах.

Однако изобилие природного газа, его дешевизна по сравнению с другими энергоносителями – это не означает вседозволенное и расточительное его использование. Здесь же следует указать, что в России энергоёмкость производства товаров и услуг в 2 раза больше, чем в странах западной Европы. В этой связи с целью экономии энергии и энергозатрат в 2010 году вступил в силу Федеральный закон №261 – ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности...». В ФГБНУ ВНИИТИН проводятся исследования по разработке энергоэкономного газоиспользующего варочного котла с регулированием расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку в процессе приготовления корма или пищи [1].

Цель работы: оценить снижение энергозатрат варочных котлов в процессе приготовления пищи или корма животным в различных режимах их работы.

Материалы и методы. Для расчета составляющих теплового баланса: полезной энергии на варку содержимого варочной ёмкости, потерь теплоты на разогрев металлоконструкций, теплопотерь от кожуха котла в окружающую среду, на продувку топочного устройства, от химического недожога газового топлива применены методы системного анализа и синтеза существующих знаний в области теплотехники [2-8].

Для экспериментального определения КПД использован действующий экспериментальный образец газоиспользующего варочного котла с регулированием расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку

Результаты и их обсуждение. Основным показателем, определяющим эффективность работы газоиспользующего варочного котла, является коэффициент полезного действия. Общеизвестно, что КПД для газоиспользующих котлов определяется делением полезно затраченной энергии на разогрев корма в варочной ёмкости до кипения и последующей варки на общую энергию, включающую полезную составляющую энергии и суммарные потери, возникающие в процессе работы котла. Применительно к газоиспользующему варочному котлу полезную составляющую определяют по формуле

$$Q = c m (t - t_0),$$

где Q – полезная энергия на приготовление корма, Вт·ч; c – удельная теплоёмкость приготавливаемого корма (продукта), Вт/кг·С; m – масса корма, кг; t_k и t_n – конечная и начальная температура приготавливаемого корма, С. Следует отметить, что удельная теплоёмкость корма

может значительно варьировать в зависимости от его состава, что может влиять на точность расчетов. Кроме того при определении КПД котла, возникают трудности, связанные с определением различных потерь энергии, которыми являются

$$Q_{\text{общ}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

где $Q_{\text{общ}}$ - суммарные потери энергии на приготовление корма, Вт-ч;

Q_1 - энергия израсходованная на нагрев металлоконструкций корпуса котла, парогенератора, варочной ёмкости, Вт-ч; Q_2 - энергия на компенсацию потерь теплоты через ограждающие конструкции котла (кожух и др), Вт-ч; Q_3 - потери энергии на продувку паровой рубашки в начальный период работы котла, Вт-ч; Q_4 –потери энергии с уходящими в атмосферу газами, Вт-ч; Q_5 – потери энергии от химического недожога топлива, возникающего в результате нарушения оптимального состава смеси газа и воздуха, Вт-ч.

В сельской местности в личных подсобных и фермерских хозяйствах, а также в столовых сельхозпредприятий, сельских школ и больниц по многим причинам возникает потребность заполнять у столитрового варочного котла варочную ёмкость на половину и меньше. А так как потребляемая энергия на разогрев металлоконструкций котла и на компенсацию теплопотерь от его кожуха в окружающую среду почти не зависят от степени заполнения варочной ёмкости, то потери энергии как при 100- процентном заполнении варочной ёмкости, так при малом заполнении одинаковые. Следовательно, расход энергии на единицу приготавливаемого корма или другого продукта будет изменяться в зависимости от уровня заполнения варочной ёмкости, то есть чем больше в варочной ёмкости приготавливаемого продукта, тем меньше расход энергии на единицу приготавливаемого продукта и на оборот, тем меньше заполнена варочная ёмкость, тем больше расход энергии на единицу приготавливаемого корма или пищи.

Рассмотрим, как изменяется КПД при загрузки варочной ёмкости от 100л до 20л. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1. Изменение КПД котла при различной загрузки варочной ёмкости

Полезный расход энергии, кВт-ч	Полный расход энергии, кВт-ч	КПД	Загрузка варочной ёмкости, л
9,86	11,6	0,84	100
8,874	11,614	0,764	90
7,88	10,62	0,74	80
5,916	8,656	0,683	60
3,946	6,684	0,59	40
1,972	4,46	0,442	20

Как следует из результатов расчета КПД уменьшается пропорционально уменьшению загрузки варочной ёмкости: от 0,84 до 0,442 при загрузке от 100л до 20л, то есть КПД уменьшился почти в 2 раза. Это следует учитывать персоналу, использующему такие варочные котлы.

Наиболее точно определить КПД газоиспользующего варочного котла можно по результатам экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования расхода газа варочным котлом были проведены в ручном и автоматическом режиме с использованием регулятора расхода газа, выполненного на базе полупроводниковых термоэлектрических элементов. По результатам экспериментальных исследований расход газа на нагрев 100л воды до кипения составляет: в ручном режиме $L_p = 747$ л, в автоматическом расхода газа $L_a = 618$ л. Время нагрева воды до кипения в ручном режиме равно 84 мин, в автоматическом – 92 мин. Для определения по экспериментальным данным составляющей полезной энергии необходимо отделить энергию варочного котла, расходуемую в режиме тихого кипения, от теплопотерь.

По данным эксперимента расход газа на компенсацию теплопотерь и поддержание тихого кипения в ручном режиме составляет $L = 1,5 \cdot 84 = 126$ л, в автоматическом - $L = 1,5 \cdot 92 = 138$ л. Отделим энергию тихого кипения от теплопотерь: на поддержание тихого кипения потребуется

перепад температур в пределах 5 °С и если 105 С обеспечивается мощностью 9л/мин, то на 5 °С нужно 0,43л/мин. Следовательно теплотери в автоматическом режиме составят

$$L_{\text{ав.пот}} = 92_{\text{мин}} \cdot (1,5 - 0,43) = 92 \cdot 1,07 = 98,44 \text{ л.}$$

Полезная составляющая определится:

$$L_{\text{полез}} = L_{\text{общ}} - L_{\text{пот}} = 618 - 98,44 = 519,56 \text{ л, тогда}$$

КПД на разогрев продукта до кипения в автоматическом режиме определится:

$$\text{КПД}_a = 519,56 / 618 = 0,84 \text{ или } 84\%.$$

Важно отметить, что полезная составляющая энергии на разогрев продукта и в автоматическом и в ручном режиме одинаковая.

Тогда КПД в ручном режиме:

$$\text{КПД}_r = 519,56 / 747 = 0,695 \text{ или } 70\%.$$

Следует отметить, что в ручном режиме расход газа в единицу времени за период нагрева постоянный, а при автоматическом регулировании расход газа на определённом временном интервале уменьшается пропорционально потребляемому тепловому потоку, то есть в ручном режиме наблюдается перерасход газа.

Важно отметить, что все выше изложенные материалы относятся к изучению расхода газа варочном котлом в режиме разогрева продукта до кипения. Это связано с тем, что варочным котлам присуща одна важная особенность: в начале нагрева температурный напор максимальный, так как температура продукта минимальная, а при закипании температурный напор минимальный, следовательно, потребляемый тепловой поток изменится в процессе нагрева от максимума до минимума. И чтобы обеспечивать такой режим разработана и исследована система пропорционального регулирования расхода газа.

И так как энергия, вырабатываемая газовой горелкой варочного котла, используется не только на разогрев продукта до кипения, но и на варку продукта в течение необходимого времени, то рассмотрим вопрос потребления газа варочным котлом за полный цикл: разогрев до кипения плюс варка продукта. Варка продукта в варочном котле с расходом газа в автоматическом режиме осуществляется на минимальной мощности в режиме тихого кипения и зависит от длительности варки продукта

$$L_v = T_v \cdot Q_{\text{тк}}$$

где T_v – время варки продукта, мин; $Q_{\text{тк}}$ – тепловой поток варочного котла в режиме тихого кипения, л/мин.

Общий расход газа

$$L_{\text{общ}} = L_{\text{рк}} + L_v,$$

где $L_{\text{рк}}$ – расход газа на разогрев до кипения, л /мин; L_v – расход газа на варку продукта после его закипания, л/мин.

Экспериментальные исследования показали, что расход газа на разогрев до кипения в регулируемом режиме изменяется не линейно, поэтому принимается по экспериментальным данным.

Как следует из литературы [9], время варки продуктов составляет широкий диапазон от 0,5 до 3-х часов. Некоторые из них приведены ниже в таблице 2

Таблица 2. Время варки продуктов

п/п	Наименование продукта	Время приготовления, ч
1	Говядина	1,5 - 2
2	Свинина	1 - 1,5
3	Курица домашняя	2 - 3
4	Цыплёнок бройлера	40 мин - 1,5 ч
5	Индейка	1 - 1,5
6	Перловка	50 мин
7	Горох	1 - 2
8	Фасоль	1,5 - 2
9	Пшено	45 мин

Исходя из данных приведённых в таблице 2 для расчета расхода газа примем верхний предел по времени приготовления продукта 3 ч (180 мин). С учетом этих данных, а так же результатов эксперимента определим суммарный расход газа, то есть на разогрев до кипения (618 л) и тихое кипение (1,5 л/мин) в течение 180 мин в автоматическом режиме до полной готовности продукта:

$$L_{\text{общ.а}} = 618 + 1,5 \cdot 180 = 888 \text{ л}$$

В ручном режиме

$$L_{\text{общ.р}} = 747 + 9 \cdot 180 = 2367 \text{ л}$$

За год при двух разовой варки в день в автоматическом режиме

$$L_{\text{общ.а}} = 888 \cdot 2 \cdot 365 = 648240 \text{ л} = 648,2 \text{ м}^3$$

В ручном режиме за год расход газа составляет

$$L_{\text{р.г}} = 2367 \cdot 2 \cdot 365 = 1\,727\,910 \text{ л} = 1727,9 \text{ м}^3$$

По данным «Омскгоргаз» [10] цена 1 м^3 сжиженного газа составляет 75р.

Тогда эксплуатационные затраты за год от сжигания газа варочным котлом при работе в автоматическом режиме составят

$$\mathcal{E}_a = 648,2 \cdot 75 = 48615 \text{ руб}$$

В ручном режиме

$$\mathcal{E}_p = 129540 \text{ руб}$$

Экономия затрат на энергообеспечение процесса приготовления корма за год по сравнению с ручным режимом составляет

$$\mathcal{E} = 129540 - 48615 = 80925 \text{ руб.}$$

Если принять затраты на устройство автоматического регулирования газа равными затратам, связанными с дополнительными затратами на обслуживание котла (ручной розжиг, затраты времени персонала на уменьшение, увеличение расхода газа в процессе варки и др.), то экономия энергзатрат является годовым экономическим эффектом, то есть годовой экономический эффект равен:

$$G_3 = 80925 \text{ руб на один варочный котёл}$$

Выводы:

1. Потери теплоты при различной загрузке варочного ёмкости почти одинаковые, в результате при уменьшении загрузки КПД так же уменьшается от 0,84 до 0,442. Это следует учитывать персоналу, обслуживающему такие варочные котлы.

2. Годовые эксплуатационные затраты на использование газа варочным котлом в ручном режиме в 2,6 раза больше, чем при применении автоматического регулирования расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку.

Список источников

1. Патент на изобретение. №2708097 РФ. СПК А47J 27/06. Котёл кормоварочный /Шувалов А.М., Машков А.Н., Чернов Д.С.; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВНИИТиН. Оpubл. 04.12.2019. Бюл. №34.
2. Ерохин В.Г. и др. Основы термодинамики и теплотехники. – М.: Машиностроение, 1980. – 224 с.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Энергия, 1973. – 303 с.
4. Михеев М.А. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 346 с.
5. Исаченко В.П. Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1981. – 416 с.
6. Беляев М.И. Тепловое оборудование. – М.: Экономика, 1990. – 559 с.
7. Литвина Л.С. Фролова З.С. Тепловое оборудование общественного питания. – М.: Экономика, 1987. – 272 с.
8. Богданов Г.А. Оборудование общественного питания. – М.: Экономика, 1991. – 317 с.

9. nyankin.ru>advice... (дата обращения: 10.03.2024).
10. Omskgorgaz.ru>akt-gaz (дата обращения: 12.03.2024).

References

1. Patent for an invention. No. 2708097 RF. SPK A47J 27/06. Feed boiler / Shuvalov A.M., Mashkov A.N., Chernov D.S.; applicant and patent holder FGBNU VNIITiN. Publ. 04.12.2019. Bull. No. 34.
2. Erokhin V.G. and others. Fundamentals of thermodynamics and heat engineering. – М.: Mechanical Engineering, 1980. – 224 p.
3. Nashchokin V.V. Engineering thermodynamics and heat transfer. – М.: Energy, 1973. – 303 p.
4. Mikheev M.A. Basics of Heat Transfer. – М.: Energy, 1977. – 346 p.
5. Isachenko V.P. Osipova V.A., Sukomel A.S. Heat transfer. – М.: Energy, 1981. – 416 p.
6. Belyaev M.I. Thermal equipment. – М.: Economics, 1990. – 559 p.
7. Litvina L.S. Frolova Z.S. Thermal equipment for public catering. – М.: Economics, 1987. – 272 p.
8. Bogdanov G.A. Catering equipment. – М.: Economics, 1991. – 317 p.
9. nyankin.ru>advice... (дата обращения: 10.03.2024).
10. Omskgorgaz.ru>akt-gaz (дата обращения: 12.03.2024).

Информация об авторах

А.М. Шувалов - доктор технических наук, профессор; А. Н. Машков - кандидат технических наук.

Information about the authors

A.Shuvalov – Full Doctor of technical sciences, Professor; A. Mashkov - Candidate of Technical Sciences.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 01.04.2024 Принята к публикации (Accepted): 23.04.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.362.34
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-61-69

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА – УСЛОВИЕ ЕГО ОБЪЕКТИВНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

*Николай Петрович Тишанинов*¹, *Александр Витальевич Анашкин*²,
*Константин Николаевич Тишанинов*³, *Сергей Владимирович Емельянович*⁴
^{1,2,3,4} *Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и
нефтепродуктов в сельском хозяйстве, Тамбов, Российская Федерация*
¹vniitinlab5@mail.ru, ²av-anashkin@mail.ru, ³tishaninovkn@rambler.ru, ⁴seruvarovo@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Александр Витальевич Анашкин, av-anashkin@mail.ru
Corresponding author: Alexander Anashkin, av-anashkin@mail.ru

Реферат. Выполнены исследования взаимосвязей периодов времени стабилизации технологического процесса триерной очистки зерна от: подачи зерносмеси в триер; ее исходной засоренности; скоростного режима работы и углового положения выводного лотка относительно горизонта, выполнены. Их проводили с использованием экспериментального оборудования, обеспечивающего отдельную, регламентированную и непрерывную подачу в триер компонентов зерносмеси с закольцованным движением очищенного зерна. Стандартные методы и приборы, а также специальные приборы, разработанные в ФГБНУ ВНИИТиН использовались для оценки физико-механических свойств компонентов зерносмеси. Установлено, что при подаче 1,2 т/ч, исходной засоренности 1,3 % и угле подъема выводного лотка 55° скоростной режим работы 36,0 об/мин является избыточным, при этом стабилизация процесса не завершается даже через 15 минут (92 %), длина свободного участка ячеистой поверхности составляет 0,70 – 0,75 м, что повышает уровень остаточной засоренности зерна до 0,025 – 0,04 %, который не соответствует требованиям к семенам категории ОС. Возможность сокращения сопоставимого уровня стабилизации процесса в 6 раз при снижении скоростного режима работы до 34,6 об/мин (на 3,9 %) подтверждена. Снижение скоростного режима работы до 34,0 об/мин приводит к росту технологических потерь до 16,85 %. Установлено, что с ростом исходной засоренности зерносмеси до 2,6 % период стабилизации процесса при скоростном режиме 34,6 об/мин увеличивается с 4,5 до 5,5 минут, а технологические потери достигают максимально допустимого значения (5 %). Уточнен метод расчета фактической степени стабилизации процесса с его оценкой по сходу примеси.

Ключевые слова: триер, процесс, режимы работы, настроечные параметры, стабилизация, засоренность, технологические потери.

STABILIZATION OF THE PROCESS IS A CONDITION FOR ITS OBJECTIVE STUDY

*Nikolai Tishaninov*¹, *Alexander Anashkin*², *Konstantin Tishaninov*³, *Sergey Emelyanovich*⁴
^{1,2,3,4} *All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture,
Tambov, Russia*
¹vniitinlab5@mail.ru, ²av-anashkin@mail.ru, ³tishaninovkn@rambler.ru, ⁴seruvarovo@yandex.ru

Abstract. Research of the interrelationships between the time periods of stabilization of the technological process of trier grain cleaning from: feeding the grain mixture into the trier; its initial contamination; speed mode of operation and angular position of the output tray relative to the horizon are satisfied. They were carried out using experimental equipment that provided separate, regulated and continuous supply of grain mixture components into the trier with a looped movement of purified grain. Standard methods and instruments, as well as special instruments developed at the Federal State Budgetary Institution VNIITiN, were used to assess the physical and mechanical properties of the components of the grain mixture. It was found that with a supply of 1.2 t/h, an initial contamination of

1.3% and a lifting angle of the output tray of 55°, the speed mode of operation of 36.0 rpm is excessive, while stabilization of the process is not completed even after 15 minutes (92%), the length of the free section of the cellular surface is 0.70 - 0.75 m, which increases the level of residual grain contamination to 0.025 - 0.04%, which does not meet the requirements for seeds of the OS category. The possibility of reducing the comparable level of process stabilization by 6 times when the operating speed is reduced to 34.6 rpm (by 3.9%) has been confirmed. Reducing the operating speed to 34.0 rpm leads to an increase in process losses to 16.85%. It has been established that with an increase in the initial contamination of the grain mixture to 2.6%, the stabilization period of the process at a speed mode of 34.6 rpm increases from 4.5 to 5.5 minutes, and technological losses reach the maximum permissible value (5%). The method for calculating the actual degree of stabilization of the process with its assessment based on the removal of impurities has been refined.

Keywords: trier, process, operating modes, setting parameters, stabilization, contamination, technological losses.

Для цитирования: Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Тишанинов К.Н., Емельянович С.В. Стабилизация процесса – условие его объективного исследования // Наука в Центральной России. 2024. Т. 68, № 2. С. 61-69. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-61-69>.

For citation: Tishaninov N, Anashkin A., Tishaninov K., Emelyanovich S. Stabilization of the process is a condition for its objective study. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 68(2): 61-69. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-61-69>.

Введение. Авторы работ [1-6] детально разработали теорию цилиндрических триеров – условий захвата и выброса частиц зерносмеси ячелями, характера циркуляции слоев зерносмеси в сегменте, количественной оценки осевого смещения зерносмеси в цилиндре и производительности триеров. Однако, аналитического уровня проработки триерных технологий недостаточно для их модернизации и управления в сложных производственных процессах. К примеру, расчетные значения производительности цилиндрических триеров в 2-3 раза отличаются от фактической, а расчетные значения показателей качества процесса имеют еще большие расхождения с практическим опытом.

Экспериментальные решения вышеуказанных задач с целью модернизации триерных технологий и управления ими в производстве, представленные в работах [7-10], не являются достаточно доказательными. Авторы работ [7, 8] использовали традиционную схему экспериментальной установки, включающей ячеистый цилиндр с регулируемым приводом, питающий бункер и мерные емкости. Доказательность результатов исследований, полученных на этой установке, вызывает сомнения по следующим причинам: зерновая смесь в питающем бункере подвергается сегрегации (концентрация примеси изменяется в 1,6 – 4 раза [11]), что исключает сохранность условий опытов во времени; бункерные питатели не обеспечивают стабилизации процесса даже при постоянстве исходной концентрации компонентов зерносмеси – время стабилизации процесса увеличивается из-за роста насыщения циркулирующих слоев зерна примесным компонентом сверх исходной концентрации, поэтому его выделение задерживается; параметры ячеистого цилиндра ($d = 220$ мм, $l = 600$ мм) не обеспечивают достоверный перенос результатов на триера с производственными линейными размерами, так как физическое моделирование процесса производится по полному составу факторов (включая свойства рабочей среды), а не только по коэффициенту кинематического подобия. Те же недостатки вполне обоснованно можно отнести и к работам [12, 13], хотя они исследуют триер с $d = 400$ мм.

Авторы [14, 15] предлагают экспериментальные установки с закольцованным движением рабочей среды, что создает предпосылки гарантированной стабилизации процесса и повышения управляемости экспериментов. В наиболее завершеном виде экспериментальная установка с закольцованным движением рабочей среды представлена в работе [14]. Она включает триерный блок с овсюжным и кукольным ячеистыми цилиндрами, бункер, две перевалочные норы, сборный транспортер и привод. Для нее также характерны недостатки, которые снижают воспроизводимость условий опытов: в бункере происходит неконтролируемая сегрегация компонентов зерносмеси; подача выделенных длинных и коротких примесей в бункер

производится со смещением по времени; вариация качества выделения примесей исключает идентичность возвращаемого и их исходного соотношений компонентов; не обеспечена возможность контроля полноты загрузки овсюжного цилиндра по длине ячеистой поверхности, что усложняет выбор решений по управлению качеством работы; нет технологических условий для обеспечения стабилизации процесса и его контроля.

Без знаний периодов стабилизации процесса триерной очистки зерна невозможно получить объективные закономерности его протекания, поэтому исследования взаимосвязей времени стабилизации процесса с режимами работы и настроечными параметрами при различных составах зерносмеси являются актуальными.

Материалы и методы. Исследования проводили на экспериментальной установке [16, 17] с раздельной подачей в триер компонентов зерносмеси, снабженной возвратным транспортером, обеспечивающей закольцованное движение рабочей среды. Стабилизацию технологического процесса контролировали по сходам зерновок основной культуры (пшеницы) и частиц примеси (овса). Пробы компонентов зерносмеси на сходах отбирали мерными емкостями с интервалом времени в 30 сек – по 30 проб в каждом опыте. Физико-механические свойства компонентов зерносмеси определяли стандартными методами и с помощью разработанных ФГБНУ ВНИИТиН специальных приборов: насыпную плотность – по ГОСТ 10840-64 с помощью контрольной емкости и весов ВК-600; влажность – по ГОСТ 13586-2015 методом выпаривания навесок в муфельной печи; угол внутреннего трения – с помощью прибора ФГБНУ ВНИИТиН (патент РФ № 2748565); коэффициент силы трения покоя – с помощью прибора ФГБНУ ВНИИТиН (патенты РФ № 2770416, 2749655); скорость витания и прочностные свойства – с помощью приборов ФГБНУ ВНИИТиН, рисунки 1 и 2.



Рисунок 1 – Парусный классификатор

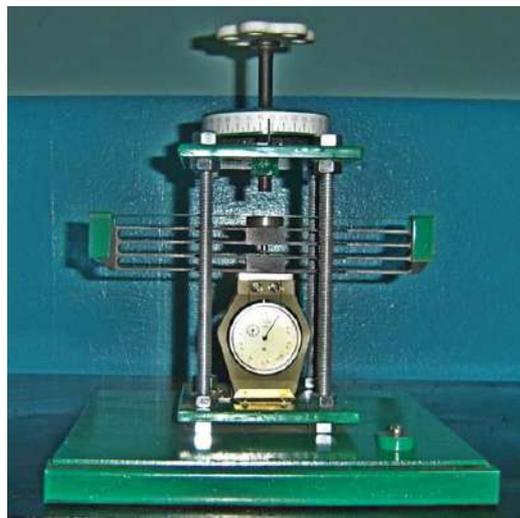


Рисунок 2 – Прибор для определения параметров деформации и разрушения зерновок

Размерные характеристики частиц зерносмеси определяли штангенциркулем. Выборки зерновок основной культуры и примесных частиц при этом составляли по 100 шт. Число размерных групп определяли по формуле Стёрджесса. Затем формировали вариационные ряды распределения размеров частиц и показатели вариации с последующим построением полигонов распределения, по которым производился выбор ячеек триерных цилиндров и корректировка размерных характеристик примесных частиц. Зону пересечения полигонов распределения длин зерновок основной культуры и примесных частиц устраняли пропуском последних через триерный цилиндр с диаметром ячеек в 9 мм.

Результаты и их обсуждение. Оперативную оценку степени стабилизации процесса триерной очистки зерна в эксперименте проводили по формулам:

$$\begin{cases} C_{(з)} = \frac{Q_{cx(з)}}{W'} \times 100\%; \\ C_{(п)} = \frac{Q_{cx(п)}}{q_n} \times 100\%, \end{cases} \quad (1)$$

где $C_{(з)}$, $C_{(п)}$ – степень стабилизации процесса, определяемая соответственно по сходу зерновок основной культуры и примеси, %;

$Q_{cx(з)}$, $Q_{cx(п)}$ – сход соответственно зерновок основной культуры и примеси, г/с;

W' , q_n – подача в триер соответственно зерна и примеси, г/с.

В опыте при производительности $W = 1,2$ т/ч, исходной засоренности $Z_{и} = 1,3$ %, угле подъема верхней кромки передней стенки выводного лотка $\gamma_n = 55^\circ$, скорости вращения ячеистого цилиндра $n = 36,0$ об/мин и продолжительности опыта 360 с степень стабилизации процесса по сходу зерновок основной культуры ($C_{(з)}$) оказалась завершенной через 240 с, а величина $C_{(п)}$ в конце опыта составила 78 %. Объясняется это тем, что циркулирующие слои зерносмеси продолжают насыщаться примесным компонентом по времени опыта $t_{оп} > 360$ с. Причем среднее содержание примеси в сегменте превышает исходную засоренность зерносмеси ($Z_{пс} > Z_{и}$)

Продление опыта с теми же условиями до 900 с (15 мин) подтверждает справедливость этого предположения, рисунок 1. Более того, через 15 минут процесс по сходу примесного компонента также остается незавершенным – $Q_{cx(п)}$ составляет 91,9% от q_n .

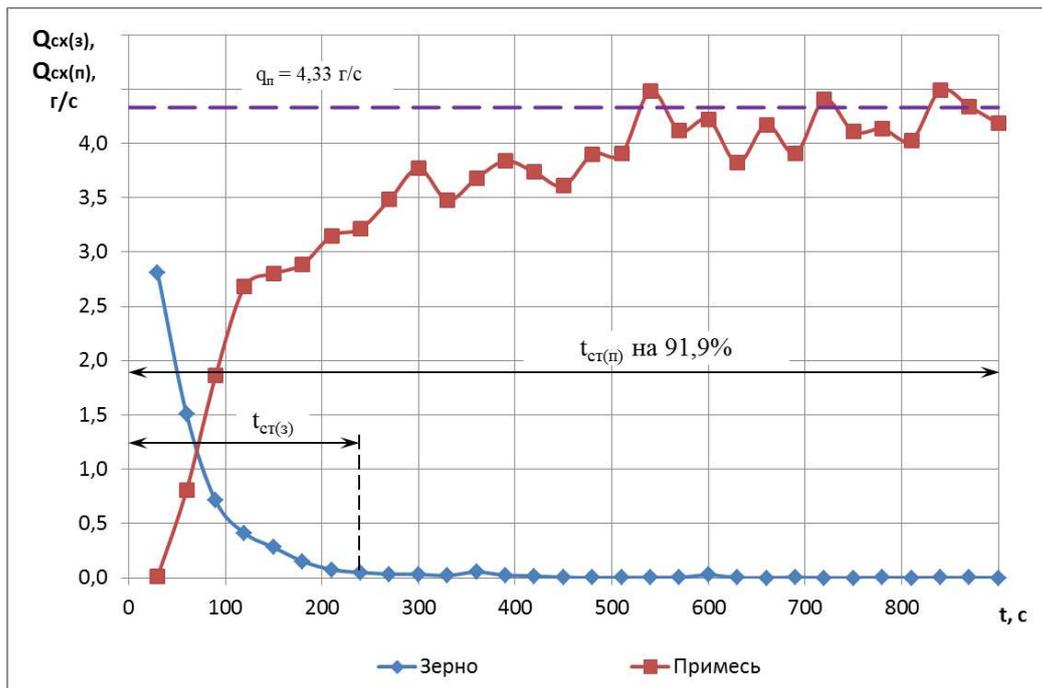


Рисунок 1 – Зависимость $Q_{cx(з)}$ и $Q_{cx(п)}$ от t при $W = 1,2$ т/ч; $Z_{и} = 1,3\%$; $\gamma_n = 55^\circ$; $n = 36,0$ об/мин

Величину $n = 36,0$ об/мин в проведенных опытах следует считать завышенной, так как свободная поверхность ячеистого цилиндра увеличивается до $l_{св} = 70 - 75$ см, а остаточная засоренность – до $Z_o = 0,025 - 0,04\%$ (8-14 штук примесных частиц на 1 кг семян), что превышает

уровень требований к семенам категории качества ОС, где не должно быть более 3-х примесных частиц на 1 кг семян.

Снижение скоростного режима работы триера при тех же условиях эксперимента по параметрам W , $Z_{и}$, $\gamma_{п}$ повышает качество процесса по остаточной засоренности $Z_o = 0,004\%$ (1,5 шт. примеси на 1 кг семян) и обеспечивает ускорение стабилизации процесса по $Q_{cx(n)}$, рисунок 2. Объясняется это тем, что при наличии допустимых технологических потерь ($\Pi = 1,09\%$) вся длина ячеистой поверхности занята зерносмесью ($l_{св} = 0$) и риски захвата длинных примесных частиц ячейками концевой участка цилиндра многократно снижаются.

Если принять во внимание сопоставимый уровень стабилизации $Q_{cx(n)}/q_{п} = 92\%$ (рисунок 1), который был достигнут через 900 с, то при $n = 34,6$ об/мин (рисунок 2) тот же уровень стабилизации процесса по величине $Q_{cx(n)}$ достигается в 6 раз быстрее. При $n = 34,6$ об/мин раньше завершается процесс насыщения зерносмеси примесным компонентом даже при незначительном понижении инерционных сил (на 8%), после чего вновь поступающие порции примеси перемещаются вместе с сегментом в верхних слоях.

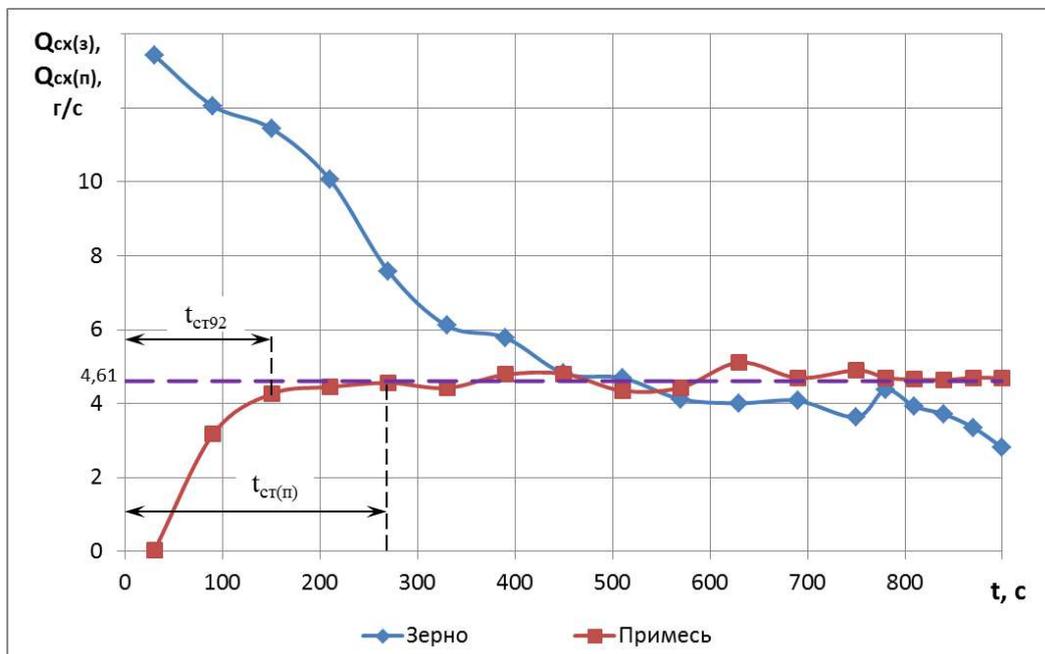


Рисунок 2 – Зависимость $Q_{cx(z)}$ и $Q_{cx(n)}$ от t при $W = 1,2$ т/ч; $Z_{и} = 1,3\%$; $\gamma_{п} = 55^\circ$; $n = 34,6$ об/мин

Большие значения скоростного режима замедляют процесс насыщения циркулирующих слоев зерносмеси примесным компонентом за счет его «выдавливания» более тяжелыми зерновками основной культуры в верхние слои.

Снижение скоростного режима работы триера ($n = 34$ об/мин) приводит к значительному росту технологических потерь (до 16,85%), что неприемлемо, так как они превышают допустимый уровень (в 3,4 раза). При этом наблюдается и некоторое снижение остаточной засоренности (на 25%).

С увеличением исходной засоренности зерносмеси до $Z_{и} = 2,6\%$ стабилизация процесса по сходу примеси за 900 с не завершается при $n = 36$ об/мин. Причем степень завершения стабилизации несколько ниже, чем при $Z_{и} = 1,3\%$ и аналогичном скоростном режиме. Он составляет 89,1%, рисунок 3.

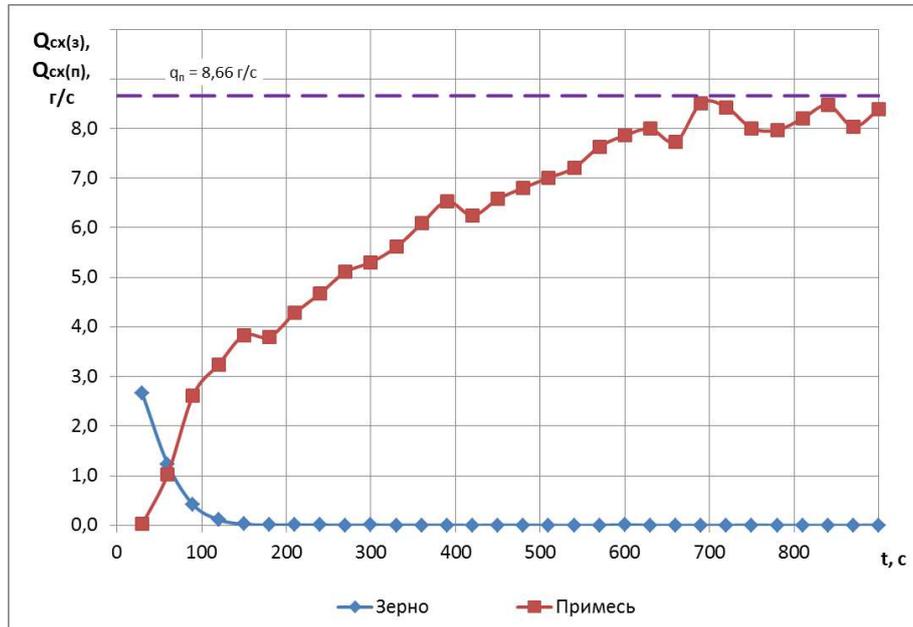


Рисунок 3 – Зависимость $Q_{cx(z)}$ и $Q_{cx(n)}$ от t при $W = 1,2$ т/ч, $Z_n = 2,6\%$, $\gamma_n = 55^\circ$, $n_1 = 36,0$ об/мин

Понижение скоростного режима до $n = 34,6$ об/мин не дает той же кратности сокращения периода стабилизации ($t_{ст}$) процесса по $Q_{cx(n)}$, она несколько ниже, чем при $Z_n = 1,3\%$, а технологические потери составили $5,0\%$, что в $4,6$ раза выше, рисунок 4.

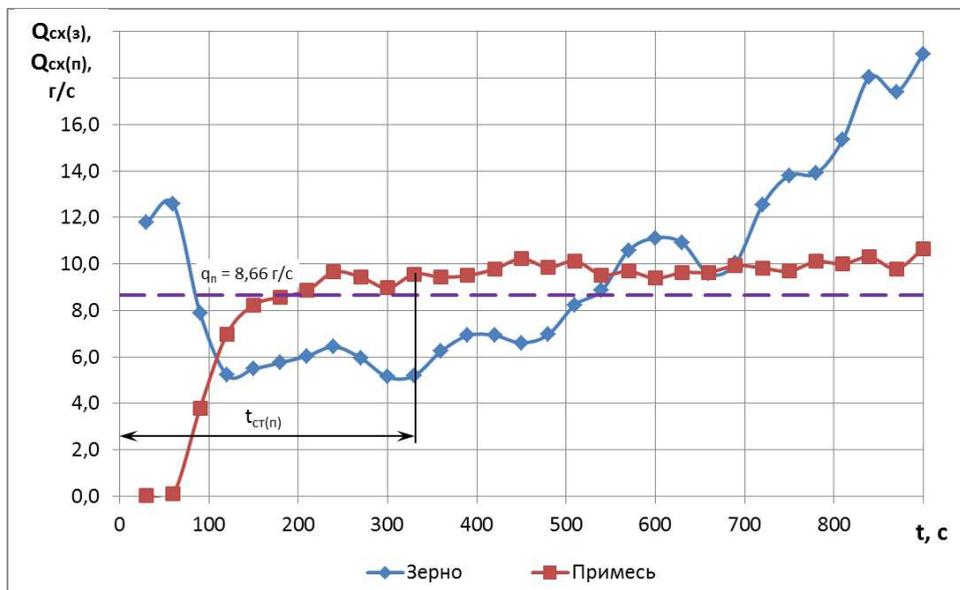


Рисунок 4 – Зависимость $Q_{cx(z)}$ и $Q_{cx(n)}$ от t при $W = 1,2$ т/ч, $Z_n = 2,6\%$, $\gamma_n = 55^\circ$, $n_2 = 34,6$ об/мин

Из рисунков 2 и 4 видно, что стабилизация процесса по сходу примеси при $n = 34,6$ об/мин и $Z_n = 1,3 - 2,6\%$ завершается через $4,5 - 5,5$ мин – $C_{(n)}$ близка к 100% . Поэтому участки функции взаимосвязи $C_{(n)} = f(t)$, когда $t > t_{ст(n)}$ следует отнести к воспроизводимым при заданных условиях опыта. Однако, оценки $C_{(n)}$ по формулам (1) не являются вполне объективными и требуют уточнения.

С учетом того, что часть примесного компонента уходит с чистым зерном, определяя величину остаточной засоренности (Z_o), величина фактического уровня стабилизации процесса по сходу примеси будет определяться по формуле:

$$C_{\Phi(n)} = \frac{Q_{cx(n)}}{q_n} \times 100\% + \frac{Z_o \cdot Q_{\sigma(n)}}{W'} \quad (2)$$

где $Q_{cx(n)}$ – сход примеси, г/с;

$Q_{\sigma(n)}$ – выход примеси, г/с;

Z_o – остаточная засоренность, %;

W' – подача зерна, г/с.

Величины W' и W связаны соотношением:

$$W' = W \cdot \frac{10^6}{3600} = 277,8 W \quad (3)$$

где W – подача зерна, т/ч.

Уравнение (2) можно представить в виде:

$$C_{\Phi(n)} = \frac{Q_{cx(n)}}{q_n} \times 100\% + \frac{Z_o \cdot (277,8W - Q_{cx(z)})}{277,8W} \quad (4)$$

где $Q_{cx(z)}$ – сход зерна (технологические потери), г/с;

Технологические потери, выражаемые долями от подачи зерна в триер, будут:

$$\Pi_o = \frac{Q_{cx(z)}}{277,8W} \quad (5)$$

После преобразования выражения (5) и подстановки в выражение (4) получим:

$$277,8W = \frac{Q_{cx(z)}}{\Pi_o}; \quad (6)$$

$$C_{\Phi(n)} = \frac{Q_{cx(n)}}{q_n} \times 100\% + \frac{Z_o \cdot Q_{cx(z)} \left(\frac{1}{\Pi_o} - 1 \right)}{Q_{cx(z)} / \Pi_o} = \frac{Q_{cx(n)}}{q_n} \times 100\% + Z_o (1 - \Pi_o). \quad (7)$$

Каждое из выражений (2 – 7) может быть использовано при анализе фактического уровня стабилизации в зависимости от базы данных.

Рассмотрим пример. При $W = 1,2$ т/ч, $Z_n = 1,3$ %, $n = 36,0$ об/мин, $\gamma_n = 55^\circ$ за период стабилизации 15 мин сход составил 91,9 % от q_n . Фактический уровень стабилизации будет:

$$C_{\Phi(n)} = 91,9 + 0,04(1 - 4 \cdot 10^{-6}) \approx 92,3\%.$$

Нужно иметь в виду то, что с ростом величины Z_o фактический уровень стабилизации процесса ($C_{\Phi(n)}$) будет существенно отличаться от расчетного значения, определяемого по $Q_{cx(n)}$.

Заключение. Существующее экспериментальное оборудование для исследований триерных технологий не обеспечивает воспроизводимость исходных условий экспериментов и управляемость ими по времени опытов, что исключает объективный анализ закономерностей технологического процесса. Основными причинами указанных недостатков являются: сегрегация компонентов зерносмеси в бункерных питателях, характерных для оборудования с цикличной загрузкой рабочей среды; неконтролируемый и изменчивый во времени возвратный состав компонентов зерносмеси в оборудовании с закольцованным движением рабочей среды. Стабильные условия эксперимента могут быть обеспечены при непрерывной, регламентированной и раздельной подаче в триер компонентов зерносмеси с закольцованным движением основного компонента (чистого зерна). Период стабилизации процесса в наибольшей степени зависит от скоростного режима работы триера, который необходимо выбирать индивидуально для каждого сочетания исследуемых факторов из условий: полная загрузка зерносмесью ячеистой поверхности по длине; минимально допустимые технологические потери.

Список источников

1. Летошнев М.Н. Сельскохозяйственные машины, теория, расчет, проектирование и испытание. – М.: Л.: Сельхозгиз. – 1955. – 856 с.
2. Карпенко А.Н., Халанский В.М. Сельскохозяйственные машины. 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос. – 1983. – 495 с.
3. Листопад Г.Е. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. – М.: Агропромиздат. – 1986. – 687 с.
4. Лурье А.Б. Расчет и конструирование сельскохозяйственных машин. – Л.: Машиностроение, 1997. – 526 с.
5. Соколов А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна. – изд. 4-е доп. и перераб. – М.: Колос, 1975. – 495 с.
6. Урханов Н.А. Исследование технологического процесса работы цилиндрического триера с целью повышения производительности и качества разделения смеси: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Урханов Н.А. – 1968. – 130 с.
7. Васильева О.П. Повышение эффективности разделения зерновой смеси путем оптимизации параметров и режимов работы триера с переменной угловой скоростью вращения цилиндра: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. / О.П. Васильева. – Киров, 2000. – 152 с.
8. Васильева О.П., Зонов Б.Д. Экспериментальные исследования взаимодействия зернового слоя с ячеистой поверхностью триера / Сб. научных трудов Пермской ГСХА. – 1998. – с. 197.
9. Евдокимов В.Ф. Исследование технологического процесса работы цилиндрического триера с осевыми колебаниями: автореферат дисс... кандидата технических наук. – Ростов-на-Дону, 1964. – 30 с.
10. Евдокимов В.Ф. Исследования работы цилиндрического триера с осевыми колебаниями // Проблемы сепарирования зерна и других сыпучих материалов: Труды ВНИИЗ. – М. – 1963. – Вып. 42. – С. 265-279.
11. Тишанинов Н.П., Анашкин А.В. Новые резервы управления качеством очистки зерна / В сборнике: Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. Материалы Международной научно-технической конференции: в 3-х томах. Минск, 16–17 октября 2013 года. – С. 266-272.
12. Сидоров И.А. Разработка и обоснование параметров цилиндрического триера с принудительным удалением фракций из ячеек: автореферат дис... канд. техн. наук. – Белгород, 1997. – 19 с.
13. Сидоров И.А. Исследование рабочего процесса цилиндрического триера с принудительным выталкиванием зерна из ячеек // Труды ВИМ. – М.: 1974. – Т. 65, ч. II. – с. 100-110.
14. Одинцов Д.В. Повышение эффективности функционирования цилиндрического триера с полимерной ячеистой поверхностью путем обоснования основных параметров и режимов работы: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Киров, 2007. – 23 с.
15. Бурков А.И., Одинцов Д.В. Оптимизация конструктивных параметров надставки лотка овсюжного цилиндра с полимерной ячеистой поверхностью // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2006. – № 8. – С. 203-206.
16. Тишанинов Н.П., Емельянович С.В. Триер с авторегулированием скоростного режима // Сельский механизатор. – 2022. – № 6. – С. 16-17.
17. Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Емельянович С.В. Результаты поисковых исследований триера с авторегулируемым скоростным режимом работы // Наука в центральной России. – 2023. – № 2 (62). – С. 54-64.

References

1. Letoshnev M.N. Agricultural machines, theory, calculation, design and testing. – M.: L.: Selkhozgiz. – 1955. – 856 p.
2. Karpenko A.N., Khalansky V.M. Agreecultural machines. Agreecultural equipment. 5th ed., revised. and additional – M.: Kolos. – 1983. – 495 p.
3. Leaf fall G.E. Agricultural and reclamation machines. – M.: Agropromizdat. – 1986. – 687 p.

4. Lurie A.B. Calculation and design of agricultural machines. – L.: Mechanical Engineering, 1997. – 526 p.
5. Sokolov A.Ya. Technological equipment of grain storage and processing enterprises. – ed. 4th add. and processed – M.: Kolos, 1975. – 495 p.
6. Urkhanov N.A. Study of the technological process of operation of a cylindrical trier in order to increase the productivity and quality of mixture separation: dis. ...cand. tech. Sciences: 05.20.01 / Urkhanov N.A. – 1968. – 130 p.
7. Vasilyeva O.P. Increasing the efficiency of separating the grain mixture by optimizing the parameters and operating modes of the trier with variable angular velocity of rotation of the cylinder: dis. ...cand. tech. Sciences: 05.20.01. / O.P. Vasilyeva. – Kirov, 2000. – 152 p.
8. Vasilyeva O.P., Zonov B.D. Experimental studies of the interaction of the grain layer with the cellular surface of the trier / Sat. scientific works of the Perm State Agricultural Academy. – 1998. – p. 197.
9. Evdokimov V.F. Study of the technological process of operation of a cylindrical trier with axial vibrations: abstract of the dissertation... candidate of technical sciences. – Rostov-on-Don, 1964. – 30 p.
10. Evdokimov V.F. Research on the operation of a cylindrical trier with axial vibrations // Problems of separation of grain and other bulk materials: Proceedings of VNIIZ. – M. – 1963. – Issue. 42. – pp. 265-279.
11. Tishaninov N.P., Anashkin A.V. New reserves for quality management of grain cleaning / In the collection: Scientific and technological progress in agricultural production. Materials of the International Scientific and Technical Conference: in 3 volumes. Minsk, October 16–17, 2013. – pp. 266-272.
12. Sidorov I.A. Development and justification of the parameters of a cylindrical trier with forced removal of fractions from the cells: abstract of thesis... Cand. tech. Sci. – Belgorod, 1997. – 19 p.
13. Sidorov I.A. Study of the working process of a cylindrical trier with forced ejection of grain from the cells // Proceedings of VIM. – M.: 1974. – Т. 65, part II. - With. 100-110.
14. Odintsov D.V. Increasing the efficiency of functioning of a cylindrical trier with a polymer cellular surface by substantiating the main parameters and operating modes: abstract of thesis. ...cand. tech. Sci. – Kirov, 2007. – 23 p.
15. Burkov A.I., Odintsov D.V. Optimization of the design parameters of the extension of a wild oat cylinder tray with a polymer cellular surface // Agricultural Science of the Euro-North-East. – 2006. – No. 8. – P. 203-206.
16. Tishaninov N.P., Emelyanovich S.V. Trier with automatic speed control // Rural machine operator. – 2022. – No. 6. – P. 16-17.
17. Tishaninov N.P., Anashkin A.V., Emelyanovich S.V. Results of search studies of a trier with an auto-regulated speed mode // Science in Central Russia. – 2023. – No. 2 (62). – pp. 54-64.

Информация об авторах

Н.П. Тишанинов - доктор технических наук, профессор; А.В. Анашкин - доктор технических наук; К.Н. Тишанинов – кандидат технических наук; С.В. Емельянович – младший научный сотрудник

Information about the authors

N. Tishaninov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher; A. Anashkin - Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher; K. Tishaninov – Candidate of Technical Sciences; S. Emelyanovich – junior researcher

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 01.02.2024 Принята к публикации (Accepted): 24.02.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.312
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-70-76

ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ВОССТАНОВЛЕННЫХ С ПОСЛЕДУЮЩИМ УПРОЧНЕНИЕМ КВДУ ЛЕМЕХОВ ОБОРОТНЫХ ПЛУГОВ

Николай Владимирович Титов

*Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, г. Орел, Российская
Федерация, ogau@mail.ru*

Реферат. *Широкое использование плугов зарубежных производителей привело к необходимости разработки технологии восстановления с последующим упрочнением сменных деталей их рабочих органов, в частности, лемехов, из-за их интенсивного изнашивания. Ситуация усугубляется тем, что в настоящее время имеют место значительные перебои в поставках запасных частей к зарубежной почвообрабатывающей технике и существенный рост их стоимости. Существующие технологии восстановления деталей данного типа не обеспечивают их высокий ресурс, в связи с чем требуют своего совершенствования. В данной работе исследовали особенности изнашивания лемехов оборотных плугов, восстановленных с использованием компенсирующих износ элементов с последующим их карбовибродуговым упрочнением (КВДУ). Производственные испытания проводили с использованием лемехов оборотного плуга EurOpal компании Lemken при вспашке средне- и тяжелосуглинистых почв. В качестве материала компенсирующего элемента использовали листы рессор из стали 65Г, утратившие свою упругость. При КВДУ использовали многокомпонентную пасту, содержащую 65% матричного порошка ПР-Х30СРНДЮ, 25% карбида бора и 10% криолита. Специфику износов режущих поверхностей лемехов по ширине изучали в трех сечениях. Проведенные производственные испытания позволили установить, что нарастание износов режущих поверхностей как серийных лемехов в состоянии поставки, так и восстановленных с последующим упрочнением КВДУ с увеличением их наработки подчиняется прямолинейной зависимости. Наибольшие износы независимо от наработки лемеха имеют в области пятки, наименьшие – вблизи зоны крепления долота. Восстановление исследуемых лемехов с последующим упрочнением КВДУ с тыльной стороны позволяет повысить их наработку до 76 га, что в среднем в 1,8 раза выше, чем у серийных лемехов в состоянии поставки. Использование предлагаемой технологии будет способствовать решению проблемы ресурсосбережения и импортозамещения.*

Ключевые слова: *лемех плуга, износ, восстановление, карбовибродуговое упрочнение, компенсирующий элемент, производственные испытания, наработка, импортозамещение.*

FEATURES OF WEAR OF PLOWS RESTORED WITH SUBSEQUENT STRENGTHENING OF CVAH REVOLVABLE PLOWS

Nikolai Titov

*Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin, Orel, Russian Federation,
ogau@mail.ru*

Abstract. *The widespread use of plows from foreign manufacturers has led to the need to develop a restoration technology with subsequent hardening of replacement parts of their working bodies, in particular plowshares, due to their intensive wear. The situation is aggravated by the fact that there are currently significant interruptions in the supply of spare parts for foreign tillage equipment and a significant increase in their cost. Existing technologies for restoring parts of this type do not provide them with a high service life, and therefore require improvement. The wear features of reversible plow shares restored using wear-compensating elements followed by carbide-arc hardening (CAH) were studied in this work. Production tests were carried out using the shares of the Lemken EurOpal reversible*

plow when plowing medium and heavy loamy soils. Spring sheets made of steel 65G, which had lost their elasticity, were used as the material of the compensating element. A multicomponent paste containing 65% matrix powder PR-Kh30SRNDYu, 25% boron carbide and 10% cryolite was used for CAH. The specific wear of the cutting surfaces of plowshares along the width was studied in three sections. The production tests carried out made it possible to establish that the increase in wear of the cutting surfaces of both serial shares in the delivery state and those restored with subsequent hardening of the high-pressure unit with an increase in their operating time is subject to a linear relationship. The greatest wear, regardless of the operating time of the ploughshare, is in the heel area, the least wear is near the bit attachment area. Restoring the studied shares with subsequent CAH on the rear side makes it possible to increase their operating time to 76 hectares, which is on average 1.8 times higher than that of serial shares in the delivered state. The use of the proposed technology will help solve the problem of resource conservation and import substitution.

Keywords: plow share, wear, restoration, carbo-vibro-arc hardening, compensating element, production tests, operating time, import substitution.

Для цитирования: Титов Н.В. Особенности изнашивания восстановленных с последующим упрочнением КВДУ лемехов оборотных плугов // Наука в Центральной России. 2024. Т. 68, № 2. С. 71-77. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-70-76>.

For citation: Titov N. Features of wear of plashes restored with subsequent strengthening of CVAN revolvable plows. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 68(2): 70-76. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-70-76>.

Введение. Лемеха плугов работают в условиях прямого воздействия абразивных частиц, в связи с чем интенсивно изнашиваются [1-3]. Использование на полях хозяйств Российской Федерации большого количества зарубежных плугов, в основном оборотных, и введенные против нашей страны санкции, обусловившие перебои с поставками запасных частей к зарубежной технике и значительное повышение их стоимости, привели к необходимости разработки технологии восстановления деталей данного типа.

Проведенный анализ литературных источников [4, 5] и собственные исследования [6, 7] позволили установить, что перспективной технологией восстановления лемехов плугов с учетом значительных величин износов их режущих поверхностей является технология компенсирующих элементов (КЭ), которые приваривают взамен предельно изношенной режущей части лемеха. В качестве материала КЭ чаще всего используют пластины из сталей 65Г, 55ГА, 60С2, которые подвергают термоупрочнению на твердость 40...45 HRC. Также возможно использование листов рессор, изготовленных из вышеуказанных материалов, потерявших при эксплуатации свою упругость, но имеющие твердость в вышеуказанных пределах. В то же время применение данной технологии, даже при использовании операции термоупрочнения КЭ, не позволяет существенно повысить ресурс восстановленных деталей.

Перспективным способом повышения ресурса рабочих органов в настоящее время является карбовибродуговое упрочнение (КВДУ). При использовании данного способа на упрочняемой поверхности рабочего органа электрической дугой расплавляется нанесенная на эту поверхность и высушенная многокомпонентная паста, в результате чего образуется металлокерамическое покрытие. Теоретические и технологические особенности технологии КВДУ подробно рассмотрены в работах [8-10].

Вместе с тем, пока еще отсутствуют сведения о работе восстановленных с последующим упрочнением КВДУ лемехов зарубежных оборотных плугов. Это обусловило необходимость проведения их производственных испытаний в условиях реальной эксплуатации с целью выявления их эксплуатационных возможностей.

Материалы и методы. При проведении исследований использовались лемеха компании Lemken, т.к. плуги данной компании являются одними из наиболее широко используемых на полях хозяйств нашей страны. В качестве материала КЭ при восстановлении лемехов использовали листы рессор, изготовленные из стали 65Г, утратившие свои упругие свойства. Для приваривания КЭ применяли ручную электродуговую сварку и электроды типа МР-3 диаметром 4

мм, имеющие стержень из малоуглеродистой стали. Их использование позволяет получить относительно невысокие значения остаточных напряжений. Сила тока при сварке составляла 160...170 А.

Для упрочнения режущих поверхностей приваренных КЭ была подготовлена многокомпонентная паста, содержащая 65% матричного порошка ПР-Х30СРНДЮ, 25% карбида бора и 10% криолита. Данный выбор обусловлен результатами проведенных лабораторных испытаний на изнашивание металлокерамических покрытий, полученных при КВДУ с использованием многокомпонентных паст различного состава [10]. Паста готовилась смешением указанных компонентов механическим способом с добавлением клея ПВА-М (связующего вещества). После нанесения паста высушивалась до затвердевания и расплавлялась с использованием угольного электрода установки ВДГУ-2 на следующих режимах: сила тока $I=70...80$ А, частота и амплитуда вибрации угольного электрода – 25 Гц и 1,1 мм соответственно.

При проведении производственных испытаний использовался пахотный агрегат, состоящий из трактора John Deere 6155М и навесного оборотного плуга EurOral компании Lemken, лемеха которого были восстановлены привариванием КЭ с последующим их упрочнением КВДУ с тыльной стороны (рисунок 1). Скорость движения при вспашке составляла 8...9 км/ч. Производственные испытания проводились в период осенней вспашки на суглинистых почвах, преимущественно средне- и тяжелосуглинистых. Техническое состояние плуга соответствовало установленным нормативно-технической документацией требованиям. Все экспериментальные лемеха проходили испытания совместно с новыми лемехами в состоянии поставки.



Рисунок 1 – Лемех плуга EurOral, восстановленный привариванием КЭ с последующим его упрочнением КВДУ с тыльной стороны

За критерий износа лемехов принималась потеря ширины лемеха, которая определялась как разность значений ширины до его эксплуатации и после определенной наработки (в среднем 5 га). По рекомендациям [11-13] измерения износов лемехов проводились по сечениям L_1 , L_2 , L_3 , проходящим через их крепежные отверстия (рисунок 2). Сечение L_1 соответствовало третьему крепежному отверстию (область пятки), сечение L_2 – второму отверстию, сечение L_3 – первому крепежному отверстию (зона крепления долота). Испытания прекращались по достижении износа лемеха по ширине, составляющего 45 мм.

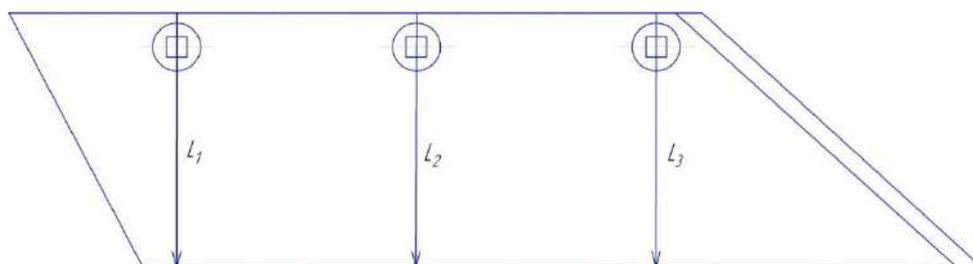


Рисунок 2 – Схема измерения линейных размеров лемехов оборотного плуга EurOral компании Lemken

Результаты и их обсуждение. Проведенные производственные испытания лемехов плуга EurOral показали, что зависимость износа их режущих поверхностей по ширине от наработки является прямопропорциональной во всех рассматриваемых сечениях. При этом было установлено, что наибольший износ независимо от наработки имеет область пятки в сечении третьего крепежного отверстия. Это может быть объяснено наиболее высоким давлением почвы при вспашке на данную область лемехов. Полученные данные согласуются с исследованиями ведущих ученых, занимающихся вопросами восстановления и упрочнения лемехов плугов различными способами и проведением их производственных испытаний [1, 5, 12, 13].

На рисунке 3 представлена зависимость износа по ширине лемехов навесного плуга EurOral в области пятки от наработки. Проведенными испытаниями установлено, что лемеха в состоянии поставки достигают своего предельного состояния (износ по ширине в области пятки 45 мм) и требуют замены при наработке в среднем 42 га (рисунок 3, линия 1). В то же время лемеха, восстановленные и упрочненные КВДУ с тыльной стороны, при аналогичной наработке имеют износ в рассматриваемой зоне около 25 мм, что в среднем в 1,8 раза ниже, чем у лемехов в состоянии поставки. До наступления предельного состояния восстановленные и упрочненные КВДУ лемеха набирают в среднем 76 га (рисунок 3, линия 2).

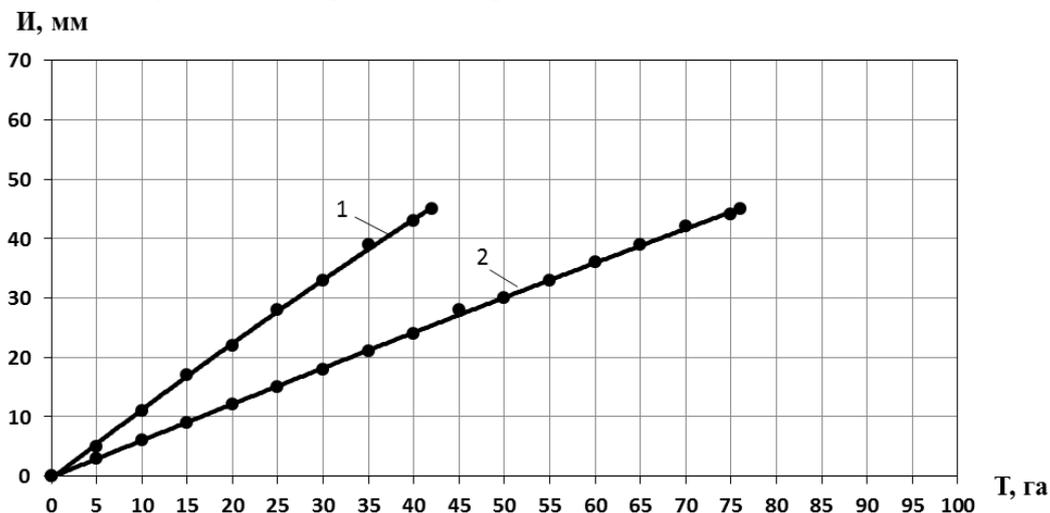


Рисунок 3 – Зависимость износа режущих поверхностей лемехов плуга EurOral по ширине в области пятки от наработки: 1 – лемех в состоянии поставки; 2 – лемех, восстановленный с последующим упрочнением КВДУ

Проведенными испытаниями также было установлено, что износы режущих поверхностей лемехов плуга EurOral по ширине в сечениях первого и второго крепежных отверстий имеют более низкие значения, чем в области пятки. Минимальные значения износов соответствуют сечению первого крепежного отверстия. Для лемехов в состоянии поставки величина износа в данном сечении в среднем составляет 34 мм, у лемехов, восстановленных с последующим упрочнением КВДУ – 16 мм. Такое распределение износов связано с возникновением так называемой «мертвой» зоны, где соприкосновение режущей поверхности лемеха и почвенной массы является минимальным из возможных. В то же время в вышеуказанной зоне возможно возникновение лучевидного износа из-за специфической траектории перемещения почвенной массы.

На рисунке 4 представлены фотографии лемехов в процессе проведения их производственных испытаний. Из представленных фотографий наглядно видна разница в износах лемеха в состоянии поставки при предельной наработке и восстановленного с последующим упрочнением КВДУ лемеха при аналогичной наработке.



а)



б)

Рисунок 4 – Лемеха оборотного плуга EurOral после проведенных производственных испытаний: в состоянии поставки (а) после предельной наработки и восстановленный с последующим упрочнением КВДУ (б) после аналогичной наработки

Заключение. Таким образом, проведенные производственные испытания показали, что основным критерием предельного состояния лемехов навесных оборотных плугов EurOral компании Lemken является износ их режущей поверхности по ширине в области пятки. Износ лемехов при увеличении наработки нарастает прямопропорционально. При этом восстановление исследуемых лемехов методом КЭ с последующим упрочнением КВДУ с тыльной стороны позволяет повысить их наработку на суглинистых почвах до 76 га, что в среднем в 1,8 раза выше, чем у лемехов в состоянии поставки. Использование предлагаемой технологии в производстве будет способствовать решению проблемы ресурсосбережения и импортозамещения.

Список источников

1. Новиков В.С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин: монография. М.: ИНФРА-М, 2019. 155 с.
2. Лялякин В.П., Соловьев С.А., Аулов В.Ф. Состояние и перспектива упрочнения и восстановления деталей почвообрабатывающих машин сварочно-наплавочными методами // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 115. С. 96-104.
3. Ткачев В.Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания. М.: Машиностроение, 1995. 336 с.
4. Казанцев С.П., Михальченкова М.А., Поджарая К.С. Упрочняющие технологии восстановления и изготовления деталей почвообрабатывающих машин применением компенсирующих элементов и их преимущества // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 116. С. 102-107.
5. Михальченков А.М., Гуцан А.А., Феськов С.А. Импортозамещение при восстановлении составных лемехов с использованием утилизированных материалов // Вестник Брянской ГСХА. 2023. № 4 (98). С. 46-52.
6. Патент 2549788. Способ упрочняющего восстановления лемехов плугов / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко. Бюл. 2015. № 12.

7. Титов Н.В., Коломейченко А.В. Универсальная технология восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 121. С. 291-297.
8. Титов Н.В., Коломейченко А.В., Логачев В.Н. и др. Технология карбовибродугового упрочнения и целесообразность её использования в агропромышленном комплексе // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2022. №1 (33). С. 117-124.
9. Адигамов Н.Р., Гималтдинов И.Х., Галиев И.Г. и др. Обработка результатов экспериментальных исследований использования технологий комплексного микроплазменного упрочнения рабочих органов и деталей сельскохозяйственных машин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 3 (71). С. 68-75.
10. Титов Н.В., Коломейченко А.В., Логачев В.Н. Повышение ресурса рабочих органов машин, эксплуатируемых в абразивной среде, способом карбовибродугового упрочнения // Технический сервис машин. 2023. № 4 (153). С. 97-102. DOI 10.22314/2618-8287-2023-61-4-97-102.
11. Михальченков А.М., Шустов А.Ф. Особенности изнашивания и ресурс восстановленных импортных составных лемехов при пахоте на супесчаных почвах // Техника и оборудование для села. 2017. № 11. С. 37-40.
12. Феськов С.А., Бирюлин А.А., Лузик В.М. и др. Износы составных лемехов плугов на примере компании "ФОГЕЛЬ И НООТ" // Труды инженерно-технологического факультета Брянского государственного аграрного университета. 2021. № 1. С. 110-129.
13. Михальченков А.М., Гуцан А.А., Козарез И.В. Износостойкость и ресурс восстановленных и упрочненных двухсторонним наплавочным армированием составных лемехов // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 4 (92). С. 65-70. DOI 10.52691/2500-2651-2022-92-4-65-70.

References

1. Novikov V.S. Ensuring the durability of working bodies of soil-cultivating machines: monograph. M.: INFRA-M, 2019. 155 p.
2. Lyalyakin V.P., Solovyov S.A., Aulov V.F. State and prospects of strengthening and restoration of parts of soil-cultivating machines using welding and surfacing methods // Proceedings of GOSNITI. 2014. T. 115. pp. 96-104.
3. Tkachev V.N. Performance of machine parts under conditions of abrasive wear. M.: Mechanical Engineering, 1995. 336 p.
4. Kazantsev S.P., Mikhalkhenkova M.A., Podzharaya K.S. Strengthening technologies for the restoration and manufacture of parts for tillage machines using compensating elements and their advantages // Proceedings of GOSNITI. 2014. T. 116. pp. 102-107.
5. Mikhalkhenkov A.M., Gutsan A.A., Feskov S.A. Import substitution in the restoration of composite shares using recycled materials // Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy. 2023. No. 4 (98). pp. 46-52.
6. Patent 2549788. Method for strengthening restoration of plow shares / N.V. Titov, A.V. Kolomeichenko. Bull. 2015. No. 12.
7. Titov N.V., Kolomeichenko A.V. Universal technology for restoration and strengthening of working bodies of tillage machines // Proceedings of GOSNITI. 2015. T. 121. pp. 291-297.
8. Titov N.V., Kolomeichenko A.V., Logachev V.N. and others. Technology of carbide-arc hardening and the feasibility of its use in the agro-industrial complex // Innovations in the agro-industrial complex: problems and prospects. 2022. No. 1 (33). pp. 117-124.
9. Adigamov N.R., Gimaltdinov I.Kh., Galiev I.G. etc. Processing the results of experimental studies of the use of technologies for complex microplasma hardening of working bodies and parts of agricultural machines // Bulletin of the Kazan State Agrarian University. 2023. T. 18. No. 3 (71). pp. 68-75.
10. Titov N.V., Kolomeichenko A.V., Logachev V.N. Increasing the service life of working parts of machines operated in an abrasive environment using the method of carbide-arc hardening // Technical service of machines. 2023. No. 4 (153). pp. 97-102. DOI 10.22314/2618-8287-2023-61-4-97-102.
11. Mikhalkhenkov A.M., Shustov A.F. Peculiarities of wear and service life of restored imported composite ploughshares when plowing on sandy loam soils // Equipment and equipment for rural areas. 2017. No. 11. pp. 37-40.
12. Feskov S.A., Biryulin A.A., Luzik V.M. and others. Wear of composite plowshares on the

example of the company "VOGEL AND NOOT" // Proceedings of the Engineering and Technology Faculty of Bryansk State Agrarian University. 2021. No. 1. P. 110-129.

13. Mikhailchenkov A.M., Gutsan A.A., Kozarez I.V. Wear resistance and service life of composite shares restored and strengthened by double-sided surfacing reinforcement // Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy. 2022. No. 4 (92). pp. 65-70. DOI 10.52691/2500-2651-2022-92-4-65-70.

Информация об авторах

Н.В. Титов – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Надежность и ремонт машин»

Information about the authors

N. Titov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Reliability and Machinery Repair.

Поступила в редакцию (Received): 11.03.2024 Принята к публикации (Accepted): 22.04.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.431.3; 631.361.022
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-77-85

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЕННОГО СЛОЯ ДЛЯ УТОЧНЕННЫХ РАСЧЕТОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ НА ПРОЧНОСТЬ

Игорь Львович Абрамов¹, Михаил Михайлович Ковалев², Геннадий Анатольевич Перов³

^{1,2,3} Федеральный научный центр лубяных культур, г. Тверь, Российская Федерация

¹ i.abramov@vniiml.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5777-2798>,

² m.kovalev@fncl.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>,

³ g.perov@fncl.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>

Автор, ответственный за переписку: Игорь Львович Абрамов, i.abramov@vniiml.ru
Corresponding author: Igor Abramov, i.abramov@vniiml.ru

Реферат. В статье рассмотрены вопросы повышения надежности взаимодействующих с поверхностью почвы рабочих органов сельскохозяйственных машин. Предложена модель нагружения, основанная на учете микронеровностей поверхностного слоя почвы с использованием фрактальной модели поверхности, построенной по алгоритму diamond-square. Показано, что параметры микронеровностей поверхности почвы, рассчитанные при помощи предлагаемой модели, соответствуют экспериментальным данным, полученным при профилографировании поверхности почвы при предпосевной обработке и в период приготовления льнотресты. Произведен сравнительный расчет нагружения зуба игольчатой бороны и зуба вспушивателя в соответствии с моделью ровной поверхности почвы и поверхностью почвы, имеющей микрорельеф, смоделированный по предлагаемой модели. Показано, что механические напряжения в рабочих органах, взаимодействующих с поверхностью почвы, нагруженных согласно предлагаемой модели, больше на 14% при предпосевной обработке, а при приготовлении льнотресты на 25%, чем при расчете с использованием модели ровной поверхности почвы. Применение модели микрорельефа оптимально как при расчете почвообрабатывающих машин так и при расчете других льноуборочных машин (теребильных аппаратов, вспушивателей лент льнотресты, пресс-подборщиков и прочих агрегатов), не предназначенных для непосредственной обработки почвы, но имеющих контакт с ней при выполнении технологического процесса.

Ключевые слова: надежность, фрактальная поверхность, расчет на прочность, моделирование поверхности почвы.

MODELING THE MICRORELIEF OF THE SURFACE OF THE SOIL LAYER FOR REFINED CALCULATIONS OF WORKING BODIES FOR STRENGTH

Igor Abramov¹, Mixail Kovalev², Gennady Perov³

^{1,2,3} Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Tver, Russian Federation

¹ i.abramov@vniiml.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5777-2798>,

² m.kovalev@fncl.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>,

³ g.perov@fncl.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>

Abstract. Issues of increasing the reliability of working parts of agricultural machines interacting with the soil surface are discussed in the article. A loading model based on taking into account microroughness of the surface soil layer using a fractal surface model constructed using the diamond-square algorithm is proposed. It is shown that the parameters of microroughness of the soil surface, calculated using the proposed model, correspond to experimental data obtained by profiling the soil surface during pre-sowing treatment and during the preparation of flax. A comparative calculation of the loading of the needle harrow tooth and the tiller tooth was carried out in accordance with the model of a flat soil surface and a soil surface with a microrelief, modeled according to the proposed model. It is

shown that the mechanical stresses in the working bodies interacting with the soil surface, loaded according to the proposed model, are 14% greater during pre-sowing treatment, and 25% greater when preparing flax trust, than when calculated using a model of a flat soil surface. The use of a microrelief model is optimal both when calculating soil tillage machines and when calculating other flax harvesting machines (pulling machines, flax sliver fluffers, balers and other units) that are not intended for direct tillage of the soil, but have contact with it during the technological process..

Keywords: *reliability, fractal surface, strength calculation, soil surface modeling.*

Для цитирования: Абрамов И.Л., Ковалев М.М., Перов Г.А. Моделирование микрорельефа поверхности почвенного слоя для уточнения расчетов рабочих органов на прочность // Наука в Центральной России. 2024. Т. 68, № 2. С. 77-85. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-77-85>.

For citation: Abramov I., Kovalev M., Perov G. Modeling the microrelief of the surface of the soil layer for refined calculations of working bodies for strength. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 68(2): 77-85. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-77-85>.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНЦ ЛК (№ FGSS-2022-0005).

Acknowledgments: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment for the Federal Scientific Center for Bast Crops (No. FGSS-2022-0005).

Введение. Современное сельскохозяйственное производство характеризуется высокой интенсификацией, что предъявляет все более высокие требования к надежности применяемых в производстве машин и их отдельных узлов [1].

Задача надежности взаимодействующих с поверхностью почвы рабочих органов сельскохозяйственных машин, является одной из важнейших в настоящее время, поскольку снижение простоев в связи с поломками оборудования и увеличение межсервисного интервала, позволит значительно повысить производительность труда. Кроме того, важной остается задача снижения затрат при производстве и эксплуатации современного парка сельскохозяйственных машин и механизмов. Это, в свою очередь, требует применения как новых материалов, так и новых методик расчета при проектировании сельскохозяйственных машин [2].

При проектировании этих рабочих органов, необходимо с достаточной степенью точности оценить действующие на них силы, так как от этого зависит долговечность и надежность рабочих органов и всей машины в целом. В настоящее время при оценке действующих сил, применяется модель, имеющая ровную поверхность почвы [3, 4]. Тем не менее, данные профилографирования поверхности почвенного слоя показывают [4, 5], что характерный перепад высот микрорельефа может достигать значений более 100 мм, что сравнимо с глубиной предпосевной обработки почвы. Также для учета собственных колебаний рабочих органов при расчете на усталостную прочность необходимо знать характерный размер микронеровностей и их частотное распределение. Таким образом, необходимость учета влияния микрорельефа поверхности почвы на испытываемые рабочими органами нагрузки очевидна, а значит необходима модель поверхности почвы, которая учитывала бы наличие микрорельефа и позволяла оценивать размеры и высоту микронеровностей. Из сказанного выше видно, что полученная модель также позволит более точно оценить энергетические затраты на выполнение технологического процесса и снизить затраты на проектирование [6].

Таким образом, необходимость в создании математической модели, способной описывать поверхность почвенного слоя с достаточной точностью очевидна.

Проведенные ранее исследования показали, что размер микронеровностей поверхности почвенного слоя имеет нормальное распределение величины выступов и впадин поверхности [5, 6], поэтому для моделирования поверхности, имеющей случайный характер распределения выступов и впадин микрорельефа, подойдут алгоритмы машинной графики, используемые для построения случайных ландшафтов. В частности, учитывая самоподобный характер многих природных элементов ландшафта, удовлетворительные результаты моделирования поверхности могут дать методы, использующие фрактальную модель [6].

Цель исследования – повышение точности расчета на прочность взаимодействующих с поверхностью почвы рабочих органов сельскохозяйственных машин.

В задачи исследования входило: – разработать математическую модель, более точно описывающую микрогеометрию поверхности почвы, с которой взаимодействуют рабочие органы сельскохозяйственных машин; – получить в лабораторно-полевых опытах микрогеометрию поверхности почвы в период предпосевной ее обработки и в период приготовления льнотресты; сравнить теоретическую и реальные микрогеометрии поверхности почвы с учетом их изменения за период возделывания и уборки льна-долгунца; получить экспериментальные данные для повышения точности расчета на прочность взаимодействующих с поверхностью почвы рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Материалы и методы. После анализа возможных для применения алгоритмов, использующих фрактальную модель (симплексный шум, шум Перлина, diamond-square), было принято решение использовать алгоритм diamond square, в связи с тем, что именно он позволяет построить наиболее реалистичный рельеф [7,8]. В качестве способа построения поверхности использовался метод генерации карты высот [8-11]. Для разработки программного обеспечения было использовано средство разработки MicroSoft Visual Studio 2019. При обработке карты высот и построении поверхности использовался программный пакет MicroSoft Excel. Использование указанных выше программных продуктов и ограниченность аппаратных вычислительных ресурсов накладывает ограничение на размер генерируемой карты (128*128 ячеек), тем не менее этого размера карты вполне достаточно для анализа, в тоже время, в отличие от программ-рендеров (например, Maya) – MS Excel предоставляет инструменты для анализа геометрии поверхности. Координаты высот рассчитывались в долях от минимума и максимума, принятых равными ± 1 .

При проведении лабораторно-полевых исследований профиля поверхности почвы был использован ультразвуковой бесконтактный профилограф, обеспечивающий точность измерения (± 3 мм) [5]. Применено разработанное в среде Arduino IDE программное обеспечение, позволяющее записывать поток входящих данных в таблицу, а также визуализировать профиль поверхности в режиме реального времени. Для обработки полученных данных и визуализации сечений поверхности использовался пакет MS Excel, 3D моделирование осуществлялось в среде разработки MathLab 2018b.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 1 представлена сгенерированная карта высот с построенной по заданным параметрам поверхностью (размер поля – 128*128). На построенной поверхности цветом выделены интервалы уровней одинаковых высот.

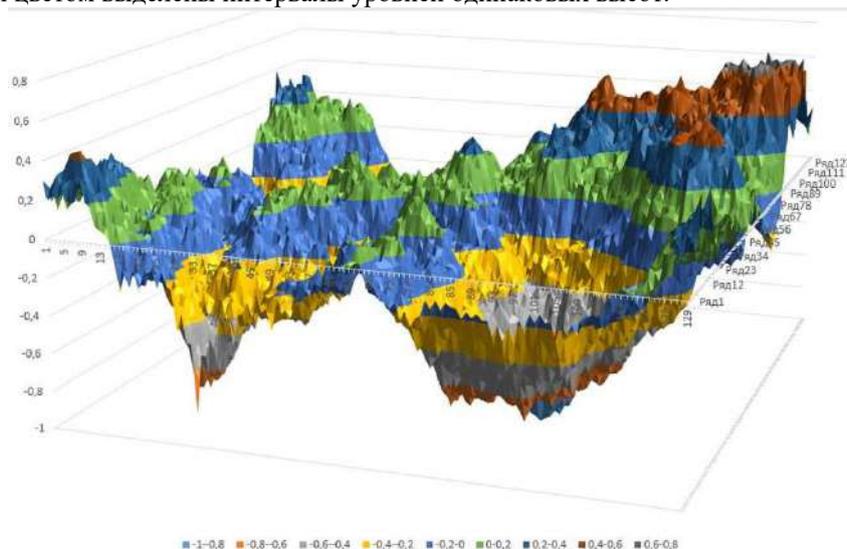


Рисунок 1 – Сгенерированная карта высот с построенной по заданным параметрам поверхностью (размер поля – 128*128)

По сгенерированной карте высот можно построить произвольные сечения поверхности. На рисунке 2 представлено продольное (а) и поперечное (б) сечение поверхности, представленной на рисунке 1.

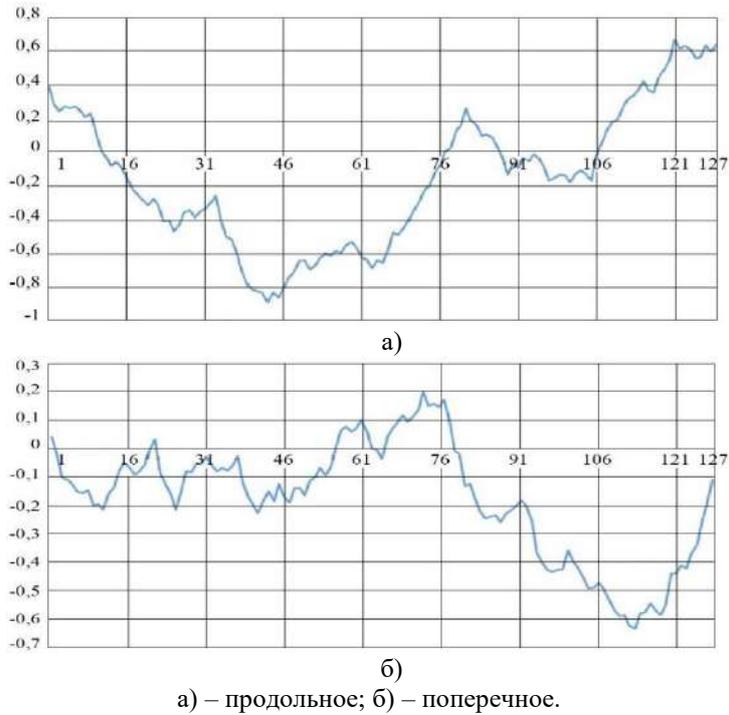
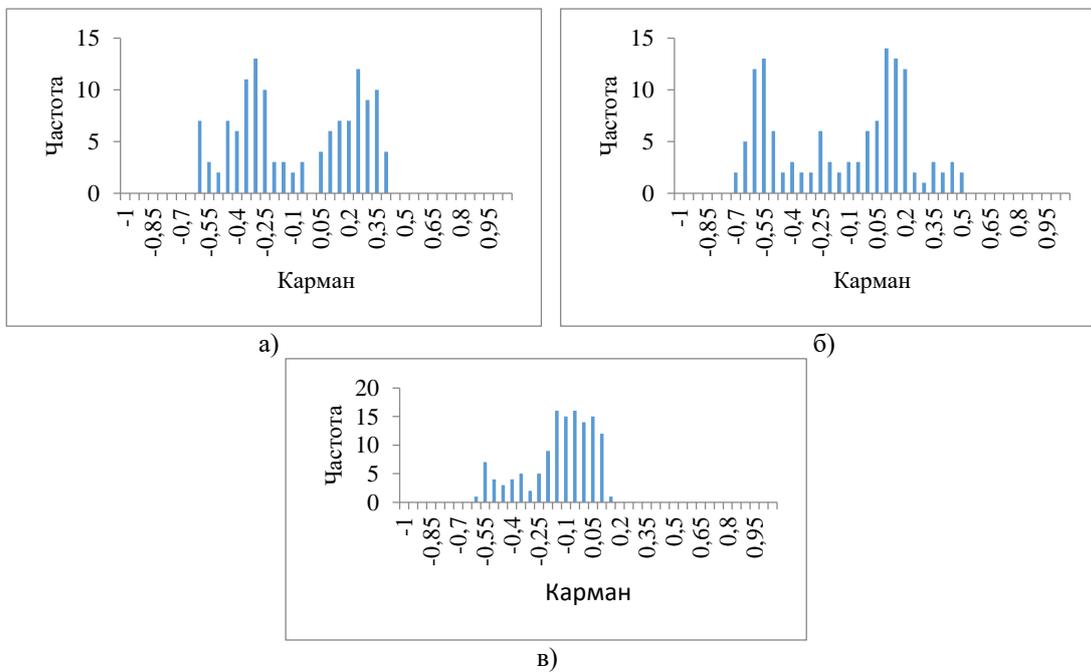


Рисунок 2 – Сечения смоделированной поверхности

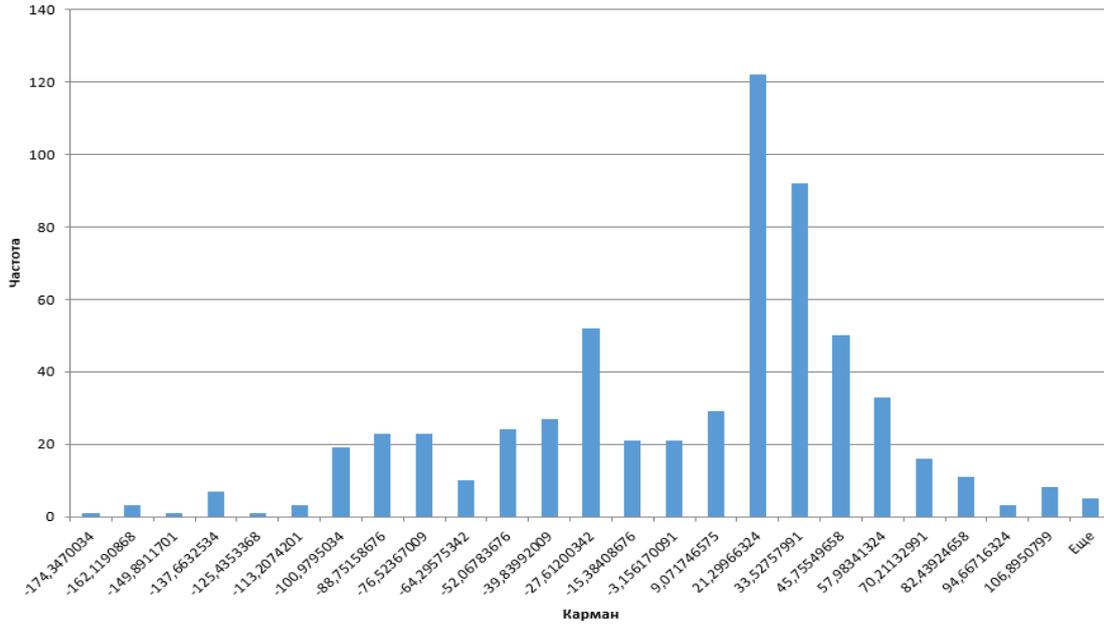


а), б), в) – произвольно взятые продольные сечения поверхности

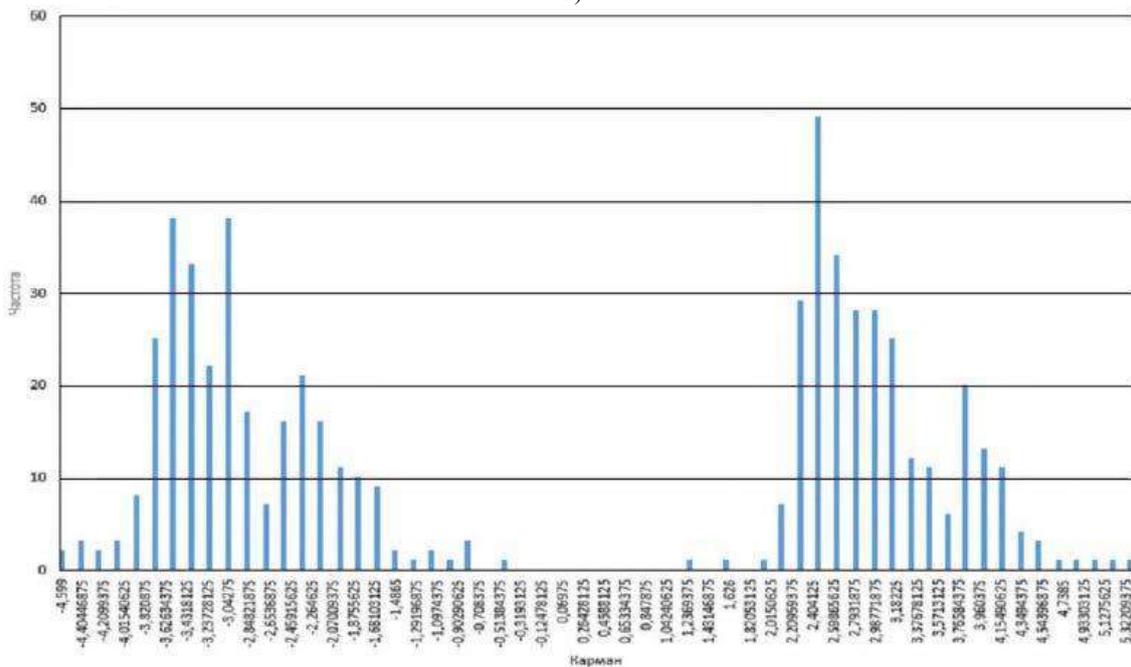
Рисунок 3 – Частотное распределение микронеровностей поверхности почвы, источник данных – моделирование

На рисунке 4 представлены гистограммы распределения частот высот микронеровностей по данным профилографирования реальной поверхности после пахоты (4, а) и после предпосевной обработки игольчатой бороной (4, б) [5] и в период приготовления льнотресты (4, в).

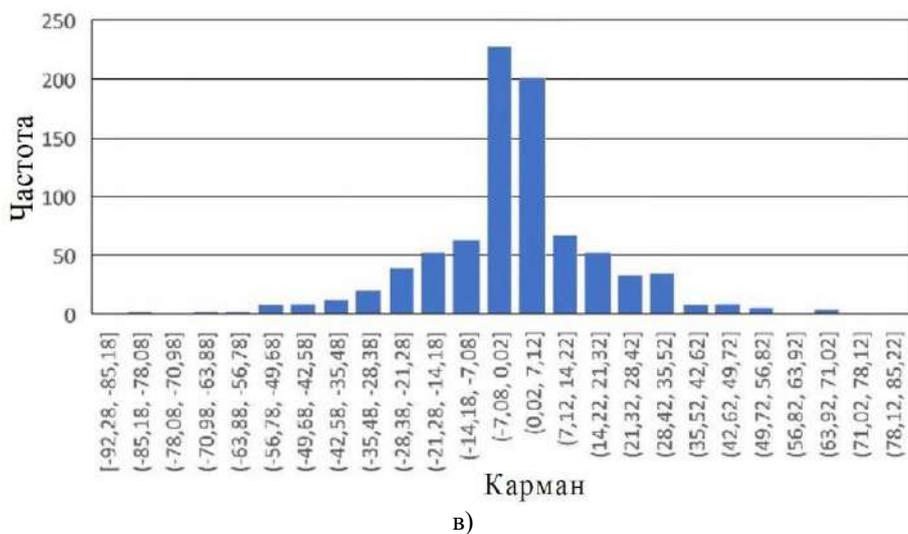
Анализ данных, полученных измерением профиля поверхности почвы, показывает, что распределение размера микронеровностей имеет нормальный характер с двумя выраженными максимумами, один в отрицательной части значений, другой – в положительной [5]. Аналогичная картина наблюдается и в данных моделирования, то есть можно говорить о том, что характер распределения размера микронеровностей одинаков и является нормальным.



а)



б)



- а) – после пахоты; б) – после предпосевной обработки игольчатой бороной;
 в) – в период приготовления льнотресты

Рисунок 4 – Частотное распределение микронеровностей поверхности почвы по данным профилографирования

Однако, сравнение модельных и экспериментальных данных показывает, что по данным профилографирования на поверхности предпосевной обработки игольчатой бороной максимум частоты впадин микронеровностей приходится примерно на 15% от максимального значения, тогда как по данным моделирования его значение составляет около 40% для отрицательных значений, в тоже время для положительной части значений высот микронеровностей эти параметры составляют 14% и 19% соответственно. Аналогичная картина наблюдается и при сравнении модельных и экспериментальных данных поверхности почвы в период приготовления льнотресты, но с более выраженным перепадом выступов и впадин микронеровностей. Данный процесс происходит вследствие воздействия на почву в период от посева до уборки погодных условий, в частности дождей. Следовательно, размер выступов модель описывает гораздо более точно, чем размер впадин.

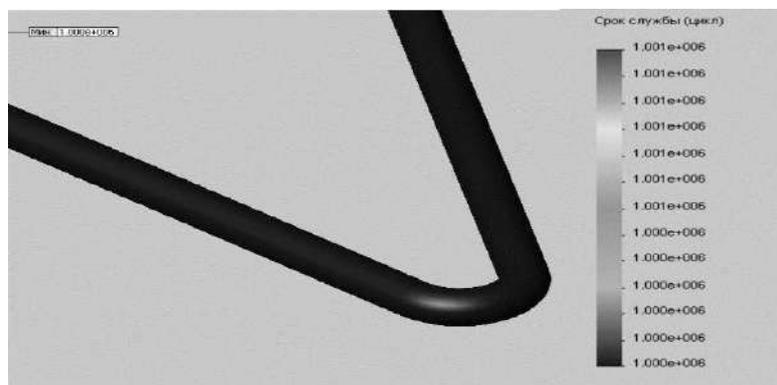
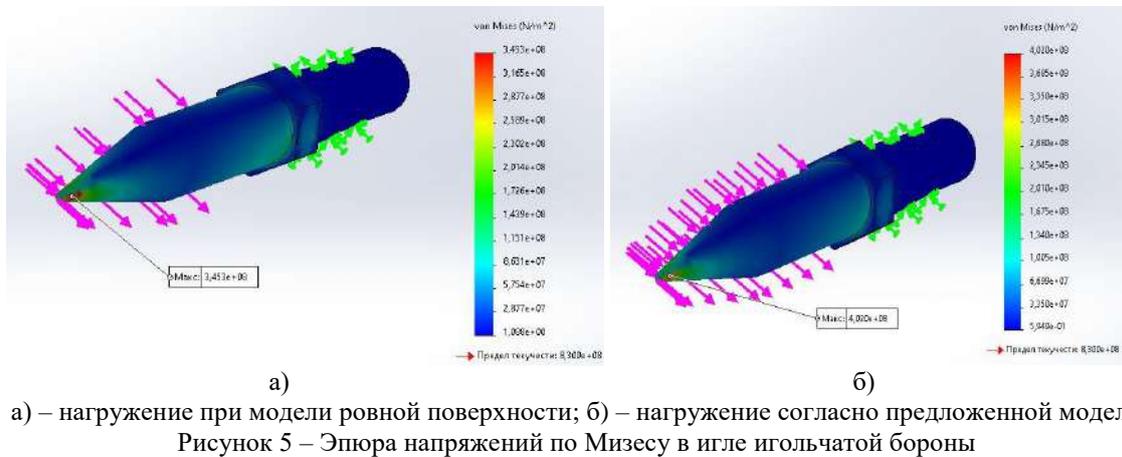
Объяснить такое расхождение можно тем, что при построении модели не принимался в расчет тот факт, что после обработки почвы и формирования микрорельефа сразу же начинается его разрушение, что приводит к снижению среднего значения величины впадины микрорельефа. А поскольку заполнение впадин рельефа происходит гораздо менее плотно, чем было до обработки почвы, то и заполнение впадин происходит сильнее, чем разрушение выступов.

Однако, учитывая тот факт, что при оценке максимального нагружения почвообрабатывающего рабочего органа основным фактором является его заглубление [3] (то есть размер именно выступов микрорельефа), данная модель позволяет оценить этот параметр точнее, чем при использовании модели ровной поверхности.

В качестве примеров применения разработанной модели для расчета почвообрабатывающего рабочего органа, на рисунке 5 приведены эпюры механических напряжений в игле игольчатой бороны, а на рисунке 6 расчетные значения предела выносливости зуба вспушвателя ВЛЛ-3 [12].

Проведенные расчеты показывают, что при учете неровного характера обрабатываемой поверхности, напряжения на рабочий орган возрастают при предпосевной обработке на 14%, а при приготовлении льнотресты до 25% при сохранении действующей силы сопротивления почвы обработке постоянной. Соответственно, коэффициент запаса прочности уменьшается на такую же величину.

Таким образом, предложенная модель позволяет более точно проводить расчеты на прочность почвообрабатывающих рабочих органов на их максимальные нагрузки.



Кроме того, следует отметить, что использование предложенной модели микрорельефа поверхностного слоя не ограничивается только расчетом рабочих органов, предназначенных для контактного взаимодействия с почвой. Применение модели микрорельефа оптимально при расчете других льноуборочных машин (теребильных аппаратов, вспушвателей лент льнотресты, пресс-подборщиков и прочих агрегатов), не предназначенных для непосредственной обработки почвы, но имеющих контакт с ней при выполнении технологического процесса. Моделирование микрорельефа поверхности почвы в соответствии с предлагаемой моделью, позволит более точно установить рабочий орган относительно поверхности почвы и обеспечить его работу без поломок.

Заключение. Обоснована необходимость учета параметров микрорельефа поверхности почвы в расчетах на прочность, взаимодействующих с поверхностью почвы рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Разработано программное обеспечение для моделирования микрорельефа почвы по алгоритму diamond-square, проведен сравнительный анализ соответствия характера микронеровностей математической модели и реальных данных, полученных профилографированием. Установлено соответствие общего характера зависимости размера микронеровностей почвы с данными профилографирования.

Проведены расчеты на прочность почвообрабатывающего рабочего органа иглы игольчатой бороны и предела выносливости зуба вспушвателя ВЛЛ-3 с учетом влияния микрорельефа поверхности почвы. Установлено, что учет микрорельефа поверхности почвы повышает расчетные механические напряжения иглы игольчатой бороны на 14%, а зуба вспушвателя до 25%, что в свою очередь требуют увеличение диаметра зуба игольчатой бороны с 0,16 м (у

существующей игольчатой бороны) до 0,18 м, а зуба вспушвателя с 0,08 м (у существующих вспушвателей) до 0,1 м.

Список источников

1. Основные проблемы научного обеспечения льноводства / Р. А. Ростовцев, В. Г. Черников, И. В. Ушаповский, Р. А. Попов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2020. – Т. 14, № 3. – С. 45-52. – [https://doi.org/ 10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52](https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52).
2. Терновых К. С. Развитие инноваций в сельском хозяйстве: тенденции, перспективы / К. С. Терновых, В. В. Куренная, А. В. Агибалов // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. – 2020. – Т. 13, № 2(65). – С. 96-103. – [https://doi.org/ 10.17238/issn2071-2243.2020.2.96](https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2020.2.96).
3. Анализ работы игл игольчатой бороны при их качении по почве / Г. А. Хайлис, М. М. Ковалев, Н. Н. Толстухко, В. В. Шевчук // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2014. – № 5. – С. 25-29.
4. Мударисов С.Г. Повышение обработки почвы путем совершенствования рабочих органов машин на основе моделирования технологического процесса: автореф. дисс. ...докт. техн. наук: 05.20.01 / Мударисов Салават Гумерович. – Челябинск, 2007. – 40 с.
5. Абрамов И. Л. Исследование микрорельефа поверхности почвенного слоя и его влияние на силу сопротивления почвы обработке / И. Л. Абрамов // *Аграрный научный журнал*. – 2021. – № 8. – С. 87-90. – [https://doi.org/ 10.28983/asj.y2021i8pp87-90](https://doi.org/10.28983/asj.y2021i8pp87-90).
6. Тишанинов И. А. Математическая модель оценки среза грунта с помощью фрактального анализа / И. А. Тишанинов, А. С. Свиридов // *Автоматизированное проектирование в машиностроении*. – 2021. – № 10. – С. 20-22. – [https://doi.org/ 10.26160/2309-8864-2021-10-20-22](https://doi.org/10.26160/2309-8864-2021-10-20-22).
7. Voss R., *Fractals in nature: from characterization to simulation*, in *The Science of Fractal Images*, H.O. Peitgen and D. Saupe, Editor, 1988, Springer-Verlag, New York, pp. 21-70.
8. Musgrave F.K., C.E. Kolb, and R.S. Mace, *The Synthesis and Rendering of Eroded Fractal Terrains*, *Computer Graphics*, July, 1989, 23:3, pp. 41-50.
9. Снук Г. Создание 3D-ландшафтов в реальном времени с использованием C++ и DirectX9: Пер. с англ. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2007. – 368 с.
10. Санжаров А.И. К вопросу использования ГИС-технологий для агроэкологической оценки земель в адаптивно-ландшафтных системах земледелия / А.И. Санжаров, Г.П. Глазунов, Ю.А. Соловьева // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2019. – №7. – С.24-32.
11. Самсонова В.П. Оценка роли рельефа в пространственной изменчивости агрохимически важных почвенных свойств для интенсивно обрабатываемого сельскохозяйственного угодья / В.П. Самсонова, Ю.Л. Мешалкина // *Вестник Московского Университета, сер. 17. Почвоведение*. – 2014. – №3. – С. 36-44.
12. Абрамов И. Л. Исследование причин разрушения проволочного зуба вспушвателя лент лентострелы / И. Л. Абрамов // *Известия Великолукской ГСХА*. – 2018. – № 3. – С. 51-55.

References

1. The main problems of scientific support of flax growing / R. A. Rostovtsev, V. G. Chernikov, I. V. Shchapovsky, R. A. Popov // *Agricultural machines and technologies*. - 2020. – Vol. 14, No. 3. – pp. 45-52. – [https://doi.org/ 10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52](https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52).
2. Ternov K. S. Development of innovations in agriculture: trends, prospects / K. S. Ternov, V. V. Kurennaaya, A.V. Agibalov // *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*. - 2020. – vol. 13, No. 2(65). – pp. 96-103. – [https://doi.org/ 10.17238/issn2071-2243.2020.2.96](https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2020.2.96).
3. Analysis of the work of needle harrow needles during their rolling on the soil / G. A. Khailis, M. M. Kovalev, N. N. Tolstushko, V. V. Shevchuk // *Tractors and agricultural machines*. - 2014. – No. 5. – pp. 25-29.
4. Mudarisov S.G. Improvement of soil tillage by improving the working bodies of machines based on process modeling: the author's abstract. diss. ...doct. Technical sciences: 05.20.01 / Mudarisov Salavat Gumerovich. – Chelyabinsk, 2007. – 40 p.

5. Abramov I. L. Investigation of the microrelief of the surface of the soil layer and its effect on the strength of soil resistance to processing / I. L. Abramov // Agrarian Scientific journal. – 2021. – No. 8. – pp. 87-90. – <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i8pp87-90>.
6. Tishaninov I. A. Mathematical model for estimating the soil section using fractal analysis / I. A. Tishaninov, A. S. Sviridov // Computer-aided design in mechanical engineering. – 2021. – No. 10. – pp. 20-22. – <https://doi.org/10.26160/2309-8864-2021-10-20-22>.
7. Voss R., Fractals in nature: from characterization to simulation, in The Science of Fractal Images, H.O. Peitgen and D. Saupe, Editor, 1988, Springer-Verlag, New York, pp. 21-70.
8. Musgrave F.K., C.E. Kolb, and R.S. Mace, The Synthesis and Rendering of Eroded Fractal Terrains, Computer Graphics, July, 1989, 23:3, pp. 41-50.
9. Snuk G. Creating 3D landscapes in real time using C++ and DirectX9: Translated from English – М.: KUDITS-OBRAZ, 2007. – 368 p.
10. Sanzharov A.I. On the issue of using GIS technologies for agroecological assessment of lands in adaptive landscape farming systems / A.I. Sanzharov, G.P. Glazunov, Yu.A. Solovyova // Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. – 2019. - No.7. – pp.24-32.
11. Samsonova V.P. Assessment of the role of relief in the spatial variability of agrochemically important soil properties for intensively cultivated agricultural land / V.P. Samsonova, Yu.L. Meshalkina // Bulletin of the Moscow University, ser. 17. Soil science. - 2014. - No. 3. – pp. 36-44.
12. Abramov I. L. Investigation of the causes of destruction of the wire tooth of the flax belt fluffer / I. L. Abramov // Izvestiya Velikolukskaya GSHA. – 2018. – No. 3. – pp. 51-55.

Информация об авторах

И.Л. Абрамов – кандидат технических наук; М.М. Ковалев – доктор технических наук; Г.А. Перов – кандидат технических наук.

Information about the authors

I. Abramov – Candidate of Technical Sciences; M. Kovalev – Doctor of Technical Sciences; G. Perov – Candidate of Technical Sciences.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 11.03.2024

Принята к публикации (Accepted): 22.04.2024

Тип статьи: научная
УДК 620.193
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-86-97

ПРОТИВОКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА МЕДИ МАСЛЯНЫМИ КОМПОЗИЦИЯМИ С КОМБИНИРОВАННОЙ ДОБАВКОЙ М-531

*Николай Алексеевич Курьято*¹, *Лариса Геннадьевна Князева*²,
*Андрей Валерьевич Дорохов*³, *Виктория Александровна Брыксина*⁴
^{1,2,3} Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и
нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Российская Федерация
⁴ Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,
г. Тамбов, Российская Федерация
¹cska-sparta@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1319-7370>
²Knyazeva27@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3232-2210>
³dorokhov.andryusha@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1778-457X>
⁴bryksina_98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1264-1310>

Автор ответственный за переписку: Лариса Геннадьевна Князева, Knyazeva27@mail.ru
Corresponding author: Larisa Knyazeva, Knyazeva27@mail.ru

Реферат. Для поддержания работоспособности сельскохозяйственной техники и оборудования, необходимо применение противокоррозионной защиты. Была изучена эффективность масляных композиций с добавкой М-531 по отношению к меди. Составы были получены на основе индустриального и моторного М10Г₂К (как свежего, так и отработанного) масел. Их защитную способность изучали с использованием гравиметрических и электрохимических методов (поляризационных и импедансных) исследования. По полученным данным коррозионных гравиметрических испытаний в 0,5 М NaCl отмечено, что наиболее эффективными оказались композиции на основе масла М10Г₂К, при введении в них 5 масс. % добавки защитная эффективность (Z) составила 63 %, дальнейшее увеличение концентрации привело к незначительному увеличению до Z = 65 % при 10 масс. % М-531. Данные электрохимических измерений качественно подтверждают данные гравиметрических испытаний. Различия в величине защитной эффективности связаны прежде всего с разным временем воздействия агрессивной среды: продолжительность эксперимента в первом случае – 15 минут, во втором – 14 суток. По результатам поляризационных измерений наиболее эффективны были составы на основе ММО, уже при содержании 5 масс. % добавки величина Z = 98 %, в то время как композиции, содержащие 5 масс. % М-531 в И20-А и в М10Г₂К имели Z = 90 %. Результаты импедансных исследований показали, что добавление ингибитора М-531 в масла ММО, М10Г₂К и И20-А влияет на годографы импеданса меди. Концентрация ингибитора оказывала значительное влияние на изменение диаграмм Найквиста. При 3 масс. % М-531 наблюдалось умеренное изменение импеданса медного покрытия, указывающее на то, что ингибитор обладает некоторой защитной способностью против коррозии, но его эффективность может быть недостаточной для полной защиты меди. При увеличении концентрации ингибитора до 5 - 7 масс. % заметное увеличение изменения импеданса свидетельствовало о том, что большая концентрация ингибитора М-531 способствует улучшению защитных свойств медного покрытия.

Ключевые слова: атмосферная коррозия, сельскохозяйственная техника и оборудование, медь, масляные композиции, М-531.

ANTI-CORROSION PROTECTION OF COPPER WITH OILS COMPOSITIONS CONTAINING ADDITIVE M-531

*Larisa Knyazeva*¹, *Nikolay Kur'yato*², *Andrey Dorokhov*³, *Viktoriya Bryksina*⁴

^{1,2,3}All-Russian Research Institute for Use machinery and Petroleum products in Agriculture,
Tambov, Russian Federation

⁴Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation

¹cska-sparta@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1319-7370>

²Knyazeva27@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3232-2210>

³dorokhov.andryusha@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1778-457X>

⁴bryksina_98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1264-1310>

Abstract. The use of anti-corrosion protection is necessary to maintain the performance of agricultural machinery and equipment. The effectiveness of oil compositions with the addition of M-531 in relation to copper was studied. The compositions were obtained on the basis of industrial and motor M10G2k (both fresh and used) oils. Their protective ability was studied using gravimetric and electrochemical methods (polarization and impedance) studies. According to the data obtained from corrosion gravimetric tests in 0.5 M NaCl, it was noted that compositions based on M10G2k oil turned out to be the most effective when 5 wt. % of the additive, the protective effectiveness (Z) was 63%, a further increase in concentration led to a slight increase to Z = 65% at 10 wt. % M-531. The data from electrochemical measurements qualitatively confirm the data from gravimetric tests. Differences in the magnitude of protective effectiveness are associated primarily with different times of exposure to an aggressive environment: the duration of the experiment in the first case was 15 minutes, in the second - 14 days. According to the results of polarization measurements, compositions based on MMO were the most effective, already at a content of 5 wt. % additive value Z = 98%, while compositions containing 5 wt. % M-531 in I20-A and M10G2k had Z = 90%. The results of impedance studies showed that the addition of the M-531 inhibitor to MMO, M10G2K and I20-A oils affects the copper impedance hodographs. The inhibitor concentration had a significant effect on the change in Nyquist diagrams. At 3 wt. % M-531, a moderate change in copper plating impedance was observed, indicating that the inhibitor has some protective ability against corrosion, but its effectiveness may not be sufficient to fully protect copper. When the inhibitor concentration increases to 5 - 7 wt. % noticeable increase in the change in impedance indicated that a higher concentration of the M-531 inhibitor helps to improve the protective properties of the copper coating.

Keywords: atmospheric corrosion, agricultural machinery, copper, oil compositions, M-531.

Для цитирования: Курьято Н.А., Князева Л.Г., Дорохов А.В., Брыксина В.А. Противокоррозионная защита меди масляными композициями, содержащие добавку М-531 // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 86-97. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-86-97>.

For citation: Kur'yato N., Knyazeva L., Dorokhov A., Bryksina V. Anti-corrosion protection of copper with oils compositions containing additive M-531. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 68(2): 86-97. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-86-97>.

Введение. Медь является достаточно широко используемым металлом как в различных отраслях промышленности, так и в сельском хозяйстве. Этот металл обладает рядом преимуществ, делающих его незаменимым для машин и оборудования аграрного сектора. Медь обладает неплохой устойчивостью к коррозии, что позволяет использовать медные трубы и фитинги для систем полива и орошения. Медные инструменты и резервуары также отличаются долговечностью и устойчивостью к коррозии, что делает их привлекательными при обработке почвы и уходе за животными. Также медь можно использовать для производства медных сеток, которые используются в качестве подстилок для животных. Медь является важным и востребованным материалом в производстве сельскохозяйственной техники и оборудования, благодаря своим уникальным свойствам. Ее применение позволяет улучшить эффективность и экологичность сельскохозяйственного производства, а также способствует развитию инновационных технологий в аграрном секторе. Но при эксплуатации в агрессивных условиях, медь подвергается коррозионному воздействию. Для того чтобы замедлить коррозионные разрушения возможно применение различных методов: использование летучих ингибиторов коррозии (ЛИК) [1-9],

получение супергидрофобного покрытия [10-12], нанесение битумных покрытий [13], применение масляных композиций [14-18] и т.д. Целью настоящей работы является исследование эффективности консервационных составов на масляной основе с добавлением противокоррозионной комбинированной (содержит контактные и летучие компоненты) добавки М-531 по отношению к меди.

Материалы и методы. Для исследования были получены композиции, где в роли растворителя-основы использовали масла: индустриальное И20-А, моторное М10Г₂К и отработанное, а в роли добавки – комбинированный ингибитор коррозии (ИК) - М-531 производства компании Cortec Corporation, USA (на территории России и стран СНГ официальный представитель – компания ООО «КОРТЕК РУС» в концентрации от 3 до 10 масс. %).

Для нанесения покрытия образцы из меди М2 опускали в ванну консервации на 10 секунд, после чего оставляли на воздухе в подвешенном вертикальном положении на 1 сутки для стекания избытка композиции и формирования защитной пленки [17, 18]. Через 5 дней после полного высыхания, проводили испытания.

Коррозионные испытания проводили в 0,5 М растворе NaCl (ГОСТ 9.042-75). Скорость коррозии рассчитывали по потере массы образцов в процессе эксперимента по формуле:

$$K = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau},$$

где Δm - потеря массы образца, г; S – площадь поверхности, м²; τ – длительность испытаний, часы.

Защитное действие определяли по формуле:

$$Z = \frac{K_0 - K_1}{K_0} \cdot 100 \%,$$

где K_0 , K_1 – скорости коррозии в отсутствие и при наличии пленки исследуемых составов.

Для поляризационных измерений использовали потенциостат IPC-Pro MF в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки потенциала 0,66 мВ/с в электрохимической ячейке. В качестве исследуемого раствора использовали 0,5 М раствор NaCl. После погружения в раствор рабочие электроды из меди М2, армированные в оправку из эпоксидной смолы, выдерживали 10-15 мин для установления квазистационарного потенциала.

Спектры импеданса изучали в диапазоне частот ($\omega/2\pi$) 60 кГц - 10 МГц с амплитудой переменного напряжения 10 мВ, используя электрохимический измерительный комплекс Solartron (Великобритания) состоящий из анализатора импеданса SI 1255 и потенциостата SI 1287.

Образцы полировали и обезжиривали ацетоном. Измерения частотных спектров импеданса проводили через 15 минут после погружения электрода в рабочий раствор. Результаты измерения импеданса обрабатывали по программе ZView 3.0, позволяющей вести расчеты по эквивалентным схемам с числом элементов до 20. Во избежание ситуации нахождения локального минимума функции расчет повторяли несколько раз с различными начальными значениями элементов схемы.

Результаты и их обсуждение. Результаты гравиметрических исследований масляных композиций в среде 0,5М NaCl при комнатной температуре в течение 14 суток приведены в таблицах 1 - 4.

Исследование защитной эффективности неингибированных масел на меди показало, что максимальным защитным действием обладает покрытие на основе масла М10Г₂К (таблица 1). Его защитный эффект $Z = 25 \%$, при этом скорость коррозии меди $K = 2,75 \cdot 10^{-6}$ г/(м²·ч). Близкую защитную эффективность обеспечивает ММО, для которого $Z = 24 \%$, $K = 2,80 \cdot 10^{-6}$ г/(м²·ч).

Таблица 1 – Скорости коррозии и защитная эффективность меди, покрытой различными нефтяными маслами, полученные в 0,5 М растворе NaCl.

Покрытие	K, (г/м ² ·ч)	Z, %
Без покрытия	$3,67 \cdot 10^{-6}$	-
И20-А	$3,19 \cdot 10^{-6}$	13
М10Г ₂ К	$2,75 \cdot 10^{-6}$	25
ММО	$2,80 \cdot 10^{-6}$	24

Дальнейшие исследования проводили на основе этих масел с введением комбинированного

ингибитора М-531. Данные показаны в таблицах 2-4. Во всех маслах наблюдается рост защитной эффективности с увеличением концентрации добавки.

Таблица 2 – Скорости коррозии и защитная эффективность меди, покрытой составами на основе индустриального масла И20-А и ингибитора М-531 в среде 0,5М NaCl

Покрытие	K, (г/м ² ·ч)	Z, %
Без покрытия	$3,67 \cdot 10^{-6}$	-
3% М-531 в И20-А	$3,30 \cdot 10^{-6}$	10
5% М-531 в И20-А	$3,10 \cdot 10^{-6}$	16
7% М-531 в И20-А	$2,75 \cdot 10^{-6}$	25
10% М-531 в И20-А	$0,80 \cdot 10^{-6}$	51

Таблица 3 – Скорости коррозии и защитная эффективность меди, покрытой составами на основе М10Г₂к и ингибитора М-531 в среде 0,5М NaCl

Покрытие	K, (г/м ² ·ч)	Z, %
Без покрытия	$3,67 \cdot 10^{-6}$	-
3% М-531 в М10Г ₂ к	$2,14 \cdot 10^{-6}$	42
5% М-531 в М10Г ₂ к	$1,36 \cdot 10^{-6}$	63
7% М-531 в М10Г ₂ к	$1,30 \cdot 10^{-6}$	65
10% М-531 в М10Г ₂ к	$1,29 \cdot 10^{-6}$	65

Таблица 4 – Скорости коррозии и защитная эффективность меди, покрытой составами на основе ММО и ингибитора М-531 в среде 0,5М NaCl

Покрытие	K, (г/м ² ·ч)	Z, %
Без покрытия	$3,67 \cdot 10^{-6}$	-
3% М-531 в ММО	$2,07 \cdot 10^{-6}$	44
5% М-531 в ММО	$1,69 \cdot 10^{-6}$	54
7% М-531 в ММО	$1,68 \cdot 10^{-6}$	54
10% М-531 в ММО	$1,66 \cdot 10^{-6}$	55

Максимальное защитное действие у композиций на основе И20-А наблюдается при концентрации ингибитора М-531 10 масс. % и составляет Z = 51 % (таблица 2). Для композиций на основе М10Г₂к уже при 7 масс. % ингибитора Z возрастает до 65%, дальнейшее увеличение концентрации добавки не приводит к существенному увеличению защитного действия (таблица 3). Защитное действие масляных композиций на основе ММО ниже, чем композиций на основе М10Г₂к, как и в случае неингибированных масел. Из результатов испытаний с покрытиями на основе ММО (таблица 4) видно, что при введении 5 масс. % ингибитора Z = 54%, дальнейшее увеличение концентрации М-531 не приводит к существенному увеличению защитного эффекта.

Были проведены поляризационные исследования защитных свойств масляных пленок, ингибированных М-531, на меди М2. Стационарный потенциал коррозии ($E_{кор}$) меди М2 составляет -0,023 В, плотность тока коррозии в фоновом растворе ($i_{кор}$) – 0,00159 А/м². Наклон тафелевского участка (рисунок 1, таблица 5), имеющегося на анодной поляризационной кривой, составляет 60 мВ, эти значения мало зависят от типа масла и концентрации ИК. После нанесения пленки свежего масла И-20А $E_{кор}$ увеличивается до -0,025 В, а $i_{кор}$ - снижается до 0,00089·А/м². Защитная эффективность покрытия маслом И-20А на меди составляет 44 %. Введение М-531 в И-20А позволяет снизить токи коррозии и, соответственно, повысить защитную эффективность покрытия (рисунок 1, таблица 5). С ростом концентрации М-531 в И-20А, защитная эффективность на меди М2 растет и достигает максимума Z = 99 % при 7 масс. % М-531. Для композиций в М10Г₂к максимальная защитная эффективность (99 %) наблюдается при 10 масс. % М-531, а для композиций в ММО - при 5 или 7 масс. % М-531 (рисунок 1, таблица 5).

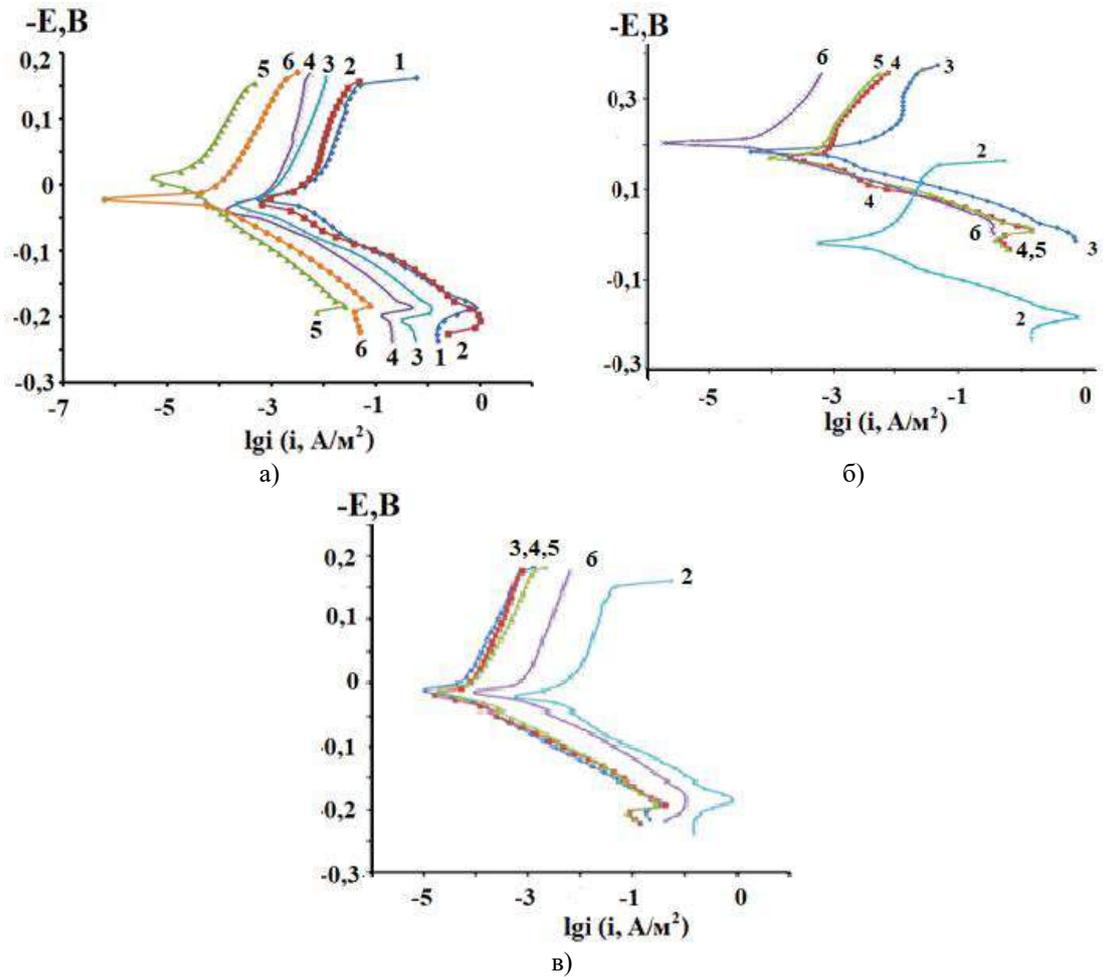


Рисунок 1 – Поляризационные кривые в 0,5М растворе NaCl на меди М2 с композициями на основе И20А(а), М10Г₂к (б), ММО (в) с М-531, масс. %:
 1 – без покрытия, 2 – 0, 3 – 3, 4 – 5, 5 – 7, 6 – 10.

Таблица 5 – Результаты электрохимических измерений на меди с покрытием на основе М531 в 0,5М растворе NaCl при комнатной температуре

Покрытие	$-E_{кор}, В$	$i_{кор}, A/m^2$	b_a	$Z, \%$
Без покрытия	0,0230	0,00159	0,060	-
И20А	0,0250	0,00089	0,060	44
И20-А + 3% М-531	-0,0938	0,00025	0,060	84
И20-А + 5% М-531	0,0433	0,00016	0,057	90
И20-А + 7% М-531	0,0245	0,00001	0,062	99
И20-А + 10% М-531	0,0200	0,00003	0,059	98
М10Г ₂ к	0,0180	0,00095	0,055	40
М10Г ₂ к + 3% М-531	-0,0094	0,00060	0,060	79
М10Г ₂ к + 5% М-531	0,0180	0,00050	0,065	82
М10Г ₂ к + 7% М-531	0,0190	0,00030	0,065	89
М10Г ₂ к + 10% М-531	0,0210	0,00003	0,052	99

ММО	0,0150	0,000025	0,055	98
ММО + 3% М-531	0,0150	0,000025	0,055	98
ММО + 5% М-531	0,0200	0,000032	0,055	99
ММО + 7% М-531	0,0210	0,000032	0,055	99
ММО + 10% М-531	0,0220	0,000200	0,055	88

Таким образом, по данным поляризационных исследований, масляные композиции на основе М-531 эффективны на меди. Масляные композиции с 7-10 масс. % М-531 позволяют почти полностью защитить медную поверхность в 0,5М растворе NaCl. Различные значения защитной эффективности, полученных при электрохимических и гравиметрических испытаниях может быть обусловлены разным временем воздействия агрессивной среды: продолжительность эксперимента в первом случае – 15 минут, во втором – 14 суток.

Также с исследуемыми композициями проводили импедансные электрохимические измерения. Для описания импеданса на меди, покрытых масляными пленками, используют схему (рисунок 1). Точки соответствуют экспериментальным результатам, а сплошные линии – расчетам на основе эквивалентной схемы. Как следует из приведенных данных, используемая в работе эквивалентная схема удовлетворительно описывает экспериментальные спектры импеданса медного электрода без покрытия и покрытого масляными пленками. На рисунке 2 приведены Диаграммы Найквиста меди для композиций с И20-А, в 0,5 М растворе NaCl. Они представляют собой комбинацию полуокружностей.

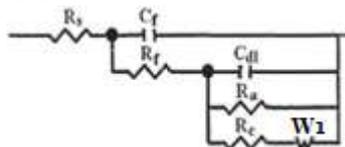


Рисунок 1 - Эквивалентная электрическая схема медного и латунного электродов с пленкой масляной композиции, в порах которой коррозионный процесс протекает по тому же механизму, что и на электроде без покрытия, где R_s – сопротивление раствора,

R_a и R_c – сопротивление переноса заряда в анодной и катодной реакциях соответственно,

C_{dl} - емкость двойного слоя (ДЭС), W_1 - конечный импеданс диффузии катодных деполаризаторов, C_f и R_f – соответственно емкость конденсатора с пленкой масла в качестве диэлектрика и сопротивление раствора в порах пленки.

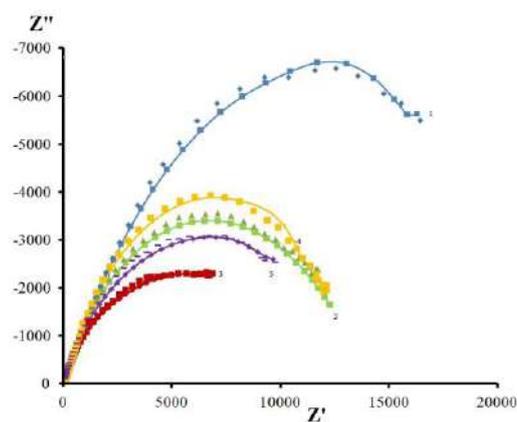


Рисунок 2 – Диаграммы Найквиста на меди под пленками масла в И20-А с добавлением ингибитора М-531: 1 – И20А без ингибитора, 2 – И20А + 3% М-531, 3 – И20А + 5% М-531, 4 – И20А + 7% М-531, 5 – И20А + 10% М-531

Начальные линейные участки годографов говорят о пористой структуре покрытий. Из рисунка

2 видно, что нанесение пленки масла И20-А, ингибированного М-531 вызывает уменьшение радиуса полуокружностей. Это свидетельствует об уменьшении общего сопротивления системы. Числовые значения элементов эквивалентных схем, приведены в таблице 6. Нанесение покрытия на медный электрод вызывает существенное уменьшение сопротивления переноса заряда в анодной и катодной реакции. Сопротивление диффузионного переноса при наличии пленки на медном электроде увеличивается, емкость ДЭС уменьшается.

Таблица 6 – Численные значения параметров эквивалентной схемы на меди М2 покрытой И20-А с добавкой комбинированного ингибитора М-531 в 0,5М NaCl

	И20-А				
	Без покрытия	3%	5%	7%	10%
R_s	16,2	21,24	14,4	21,99	6,21
C_f	$6,579210^{-7}$	$6,490910^{-7}$	$4,744310^{-7}$	$4,501310^{-7}$	$2,108610^{-7}$
R_f	261,9	200,6	285,5	224	444,1
C_{dl}	$7,897110^{-7}$	$4,13310^{-7}$	$4,666510^{-7}$	$2,989310^{-7}$	$2,765510^{-7}$
R_a	22644	12353	10549	12538	12378
R_c	332,7	0,00011231	185,6	0,00065466	575,6
W_{1-R}	92325	658,2	71827	93752	57583
W_{1-T}	3,59	0,00044348	9,034	1,646	0,990542
W_{1-P}	0,61758	0,27772	0,45761	0,62239	0,50374

На рисунке 3 приведены Диаграммы Найквиста меди в ММО, в 0,5 М растворе хлорида натрия. При сравнении годографов на рисунках 2 и 3 можно сделать вывод о том, что композиции на основе И20-А с добавкой комбинированного ингибитора М-531 в 0,5М NaCl среде соответствуют более высокие величины общего сопротивления системы.

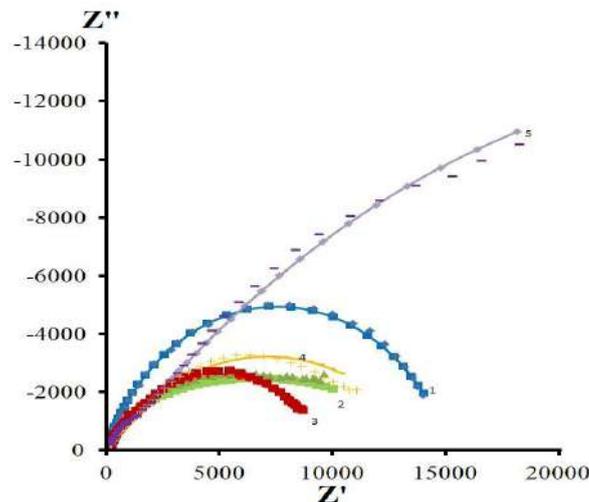


Рисунок 3 – Диаграммы Найквиста на меди, покрытой пленками ММО с добавлением ингибитора М-531: 1 – ММО без ингибитора, 2 – ММО + 3% М-531, 3 – ММО + 5% М-531, 4 – ММО + 7% М-531, 5 – ММО + 10% М-531.

Величины R_a и R_c для ММО выше, чем в И20А (таблица 7), что согласуется с более высоким защитным эффектом этих покрытий, полученным гравиметрическим методом.

Таблица 7 – Численные значения параметров эквивалентной схемы на меди М2, покрытой ММО с добавкой комбинированного ингибитора М-531 в 0,5М NaCl

	ММО				
	Без покрытия	3%	5%	7%	10%
Rs	29	4,9	5,66	13,78	19,13
Cf	3,8228E-7	5,63E-7	7,808E-14	8,4042E-7	4,7654E-7
Rf	190	244,4	1,163	70,96	428,7
Cdl	2,225E-13	3,4263E-7	8,707E-7	1,5993E-8	1,7268E-8
Ra	14793	14040	9741	13806	62942
Rc	2209	0,00045909	585,6	249,1	239
W _{1-R}	3,033	62,77	87,54	83,47	197,8
W _{1-T}	3,3124E-8	4,0179E-7	2,5705E-5	3,263E-5	6,8366E-5
W _{1-P}	0,34192	0,20388	0,30533	0,28144	0,26528

Нанесение покрытия на медный электрод вызывает существенное уменьшение сопротивления переноса заряда в катодной реакции. Сопротивление диффузионного переноса при наличии пленки на медном электроде увеличивается. Емкость двойного слоя уменьшается с увеличением концентрации ингибитора.

На рисунке 4 приведены Диаграммы Найквиста меди в М10Г₂К, в 0,5М растворе хлорида натрия. Величины элементов эквивалентных схем, описывающих годографы (рисунок 4), приведены в таблице 8. Сопротивления переноса заряда в анодной и катодной реакциях больше, чем в маслах И20-А и ММО, что согласуется с более высокой защитной эффективностью данных покрытий, как и в случае поляризационных исследований.

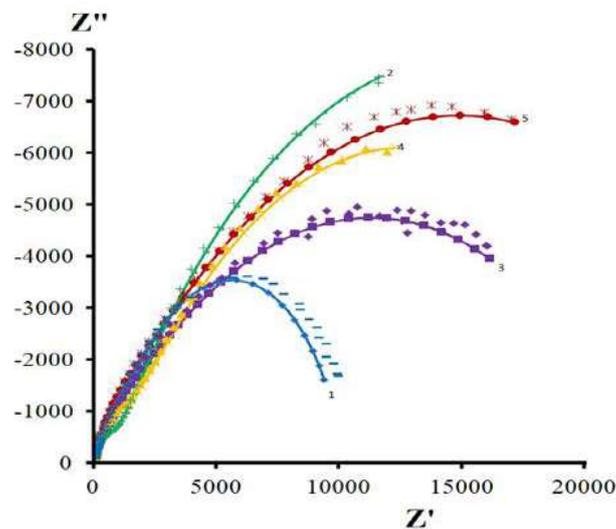


Рисунок 4 – Диаграммы Найквиста на меди, покрытой пленками масла М10Г₂К с добавлением ингибитора М-531: 1 – М10Г₂К без ингибитора, 2 – М10Г₂К + 3% М-531, 3 – М10Г₂К + 5% М-531, 4 – М10Г₂К + 7% М-531, 5 – М10Г₂К + 10% М-531

Таблица 8 – Численные значения параметров эквивалентной схемы на меди М2 покрытые М10Г₂К с добавкой комбинированного ингибитора М-531 в 0,5М NaCl

	М10Г ₂ К				
	Без покрытия	3%	5%	7%	10%
Rs	19,63	12,31	36,92	5,91	16,8
Cf	8,962E-7	8,9378E-7	7,5741E-8	4,837E-7	1,8282E-7
Rf	491,9	106,9	750,1	275,2	633,4
Cdl	1,0781E-6	2,5814E-7	1,6009E-7	2,5421E-7	1,978E-7
Ra	8700	28141	19534	22098	26199
Rc	5,097E-5	179,4	1,4021E-5	9,8757E-6	0,00098307
W ₁ -R	5080	1509	2730	3463	3419
W ₁ -T	0,026781	0,026608	0,0015186	0,031381	0,0037903
W ₁ -P	0,4064	0,30675	0,25821	0,30432	0,27391

Таким образом, результаты импедансных электрохимических исследований подтвердили результаты поляризационных исследований. Как было показано, добавление ингибитора М-531 в масла ММО, М10Г₂К и И20-А влияет на годографы импеданса меди. Концентрация ингибитора имела значительное влияние на изменение диаграмм Найквиста. При концентрации 3 масс. % ингибитора М-531 наблюдалось умеренное изменение импеданса медного покрытия. Это указывает на то, что ингибитор обладает некоторой защитной способностью против коррозии, но его эффективность может быть недостаточной для полной защиты меди. При увеличении концентрации ингибитора до 5 масс. % и 7 масс. %, наблюдалось заметное увеличение изменения импеданса. Это говорит о том, что большая концентрация ингибитора М-531 способствует улучшению защитных свойств покрытия меди от коррозии. В данном случае, масла ММО, М10Г₂К и И20-А с 5 масс. % и 7 масс. % концентрацией ингибитора показали наибольшую эффективность. Однако, при дальнейшем увеличении концентрации ингибитора до 10 масс. % наблюдалось незначительное улучшение в сравнении с концентрацией 7 масс. %. Это может указывать на насыщение системы ингибитором, при котором дальнейшее увеличение концентрации не приводит к значительному изменению значений импеданса.

Заключение. Исходя из электрохимических измерений можно отметить, что все составы имеют высокую защитную эффективность по отношению к меди, при поляризационных измерениях она составляет $Z = 90-99\%$ при 7-10 масс. % добавки. В 0,5 NaCl наиболее эффективны оказались составы на основе моторного масла М10Г₂к. При увеличении концентрации ингибитора до 5 масс. % и 7 масс. %, наблюдалось заметное увеличение изменения импеданса, дальнейшее увеличение концентрации ингибитора можно считать неоправданным с точки зрения повышения защитной эффективности. Данные электрохимических измерений качественно сочетались со значениями защитной эффективности, полученных при гравиметрических испытаниях, различия связаны с разным временем воздействия агрессивной среды: продолжительность эксперимента в первом случае – 15 минут, во втором – 14 суток.

Список источников

1. Vigdorovich V.I., Knyazeva L. G., Zazulya A.N., Prokhorenkov V.D., Dorochoy A.V., Kuznetsova E.G., Uryadnikov A.A. Use of IFKHAN Type of Volatile Inhibitors for Protection of Steel Equipment in the Atmosphere of the Livestock Premises//Russian Agricultural Sciences. 2017. Т. 43. № 2. С. 184.
2. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Zazulya A.N., Prokhorenkov V.D., Dorokhov A.V., Kuznetsova E.G., Uryadnikov A.A., Goncharova O.A.//Suppresion of Atmospheric Corrosion of Brass Using Volatile Inhibitors//Russian Agricultural Sciences. 2017. Т. 43. № 4. С. 342-346.
3. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Shel N.V., Knyazeva L.G., Dorokhov A.V., Uryadnikov A.A. Protection of Carbon Steel Against Atmospheric Corrosion by Volatile Inhibitors of IFKHAN Series at

High Concentrations of CO₂, H₂S and NH₃//International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2018. Т. 7. № 2. С. 175-184.

4. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Dorohova A.N., Dorohov A.V., Knyazeva L.G., Uryadnikov A.A. Protective Ability of Volatile Inhibitors of IFKHAN Series in Atmospheric Corrosion of Brass and Copper at High Concentrations of CO₂, NH₃ and H₂S in Air// International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2018. Т. 7. № 3. С. 331-339.

5. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Dorokhov A.V., Dorokhova A.N., Uryadnikova A.A. The Influence of the Volatile IFKHAN-114 Inhibitor on the Efficiency of a Number of Contact Galvanic Metal Pairs and Rate of Corrosion of their Constituents in the Atmosphere of livestock premises// Russian Agricultural Sciences. 2019. Т. 45. № 1. С. 99.

6. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Knyazeva L.G. Universality of Volatile Corrosion Inhibitors in Terms of Agricultural Production Requirements//Russian Agricultural Sciences. 2019. Т. 45. № 3. С. 307.

7. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Knyazeva L.G., Dorokhov A.V., Dorokhova A.N., Vigdorowitsch M.V. Suppression of Local Corrosion of Steel, brass and copper with ifkhan-114 volatile INHIBITOR//International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2019. Т. 8. № 1. С. 42-49.

8. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Ostrikov V.V., Shel' N.V., Tsygankova L.E. Permeability of Oil Films with Molecules of Water, Sulfur (IV) Oxide, and Oxygen//Polymer Science, Series D. 2019. Т. 12. № 1. С. 105-109.

9. Оценка защитной эффективности летучего ингибитора ИФХАН-114 посредством поляризационных измерений в условиях атмосферной коррозии меди. Вигдорович В.И., Цыганкова Л.Е., Князева Л.Г., Шель Н.В., Дорохов А.Н., Вигдорович М.В. // Наука в центральной России. 2023. № 1(61). С. 133-146.

10. Антикоррозионные свойства супергидрофобных покрытий на меди, полученных электроосаждением / Князева Л.Г., Цыганкова Л.Е., Курьято Н.А., Дорохов А.В., Урядников А.А., Дорохова А.Н. // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 1. С. 25-31.

11. Цыганкова Л.Е., Урядников А.А., Дорохов А.В., Князева Л.Г., Шель Н.В., Родионова Л.Д. Защита стали супергидрофобным покрытием в атмосфере с повышенным содержанием агрессивных компонентов//Коррозия: материалы, защита. 2021. № 9. С. 33-38.

12. Князева Л.Г., Цыганкова Л.Е., Курьято Н.А., Дорохов А.В., Урядников А.А., Дорохова А.Н. Антикоррозионные свойства супергидрофобных покрытий на меди, полученных электроосаждением// Коррозия: защита, материалы. Приложение к журналу "Технология металлов". 2023. № 13. С. 4-12.

13. Курьято Н.А., Князева Л.Г., Дорохов А.В., Брыксина В.А. Противокоррозионная защита стали составами на основе битумного праймера // Наука в центральной России. 2023. № 5(65). С. 112-118.

14. Князева Л.Г., Дорохов А.В., Курьято Н.А. К оценке ингибиторной защиты сельскохозяйственной техники и оборудования // Наука в центральной России. 2023. № 1(61). С. 133-146.

15. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Ostrikov V.V., Petrashev A.I. Properties of Petroleum and Synthetic Oils as Bases for Anticorrosion Materials// Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2019. Т. 55. № 4. С. 412-423.

16. Князева Л.Г., Цыганкова Л.Е., Дорохов А.В., Курьято Н.А. Масляные композиции, модифицированные летучим ингибитором, для защиты металлов от атмосферной коррозии// Коррозия: материалы, защита. 2022. № 6. С. 29-37

17. Князева Л.Г., Дорохов А.В., Курьято Н.А., Прохоренков В.Д. Исследование эффективности составов на основе CORTEC VpCl-368 и CORTEC VpCl-369 для противокоррозионной защиты сельскохозяйственной техники // Наука в центральной России. 2019. № 5. С. 69-80.

18. Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Dorokhov A.V., Kur'yato N.A. Protective efficiency of oil compositions with Cortec VpCl-368D // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2021. Vol. 10, no. 2. P. 551-561.

References

1. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Zazulya A.N., Prokhorenkov V.D., Dorochoy A.V., Kuznetsova E.G., Uryadnikov A.A. Use of IFKHAN Type of Volatile Inhibitors for Protection of Steel Equipment in the Atmosphere of the Livestock Premises//Russian Agricultural Sciences. 2017. T. 43. No. 2. P. 184.
2. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Zazulya A.N., Prokhorenkov V.D., Dorokhov A.V., Kuznetsova E.G., Uryadnikov A.A., Goncharova O.A.//Suppresis of Atmospheric Corrosion of Brass Using Volatile Inhibitors//Russian Agricultural Sciences. 2017. T. 43. No. 4. P. 342-346.
3. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Shel N.V., Knyazeva L.G., Dorokhov A.V., Uryadnikov A.A. Protection of Carbon Steel Against Atmospheric Corrosion by Volatile Inhibitors of IFKHAN Series at High Concentrations of CO₂, H₂S and NH₃//International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2018. T. 7. No. 2. P. 175-184.
4. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Dorohova A.N., Dorokhov A.V., Knyazeva L.G., Uryadnikov A.A. Protective Ability of Volatile Inhibitors of IFKHAN Series in Atmospheric Corrosion of Brass and Copper at High Concentrations of CO₂, NH₃ and H₂S in Air// International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2018. T. 7. No. 3. P. 331-339.
5. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Dorokhov A.V., Dorokhova A.N., Uryadnikova A.A. The Influence of the Volatile IFKHAN-114 Inhibitor on the Efficiency of a Number of Contact Galvanic Metal Pairs and Rate of Corrosion of their Constituents in the Atmosphere of livestock premises // Russian Agricultural Sciences. 2019. T. 45. No. 1. P. 99.
6. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Knyazeva L.G. Universality of Volatile Corrosion Inhibitors in Terms of Agricultural Production Requirements//Russian Agricultural Sciences. 2019. T. 45. No. 3. P. 307.
7. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Knyazeva L.G., Dorokhov A.V., Dorokhova A.N., Vigdorowitsch M.V. Suppression of Local Corrosion of Steel, brass and copper with ifkhan-114 volatile INHIBITOR//International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2019. T. 8. No. 1. P. 42-49.
8. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Ostrikov V.V., Shel N.V., Tsygankova L.E. Permeability of Oil Films with Molecules of Water, Sulfur (IV) Oxide, and Oxygen//Polymer Science, Series D. 2019. Vol. 12. No. 1. pp. 105-109.
9. Assessment of the protective effectiveness of the volatile inhibitor IFKhan-114 through polarization measurements under conditions of atmospheric corrosion of copper. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Knyazeva L.G., Shel N.V., Dorokhov A.N., Vigdorovich M.V. // Science in central Russia. 2023. No. 1(61). pp. 133-146.
10. Anticorrosion properties of superhydrophobic coatings on copper obtained by electrodeposition / Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Kuryato N.A., Dorokhov A.V., Uryadnikov A.A., Dorokhova A.N. // All materials. Encyclopedic reference book. 2019. No. 1. P. 25-31.
11. Tsygankova L.E., Uryadnikov A.A., Dorokhov A.V., Knyazeva L.G., Shel N.V., Rodionova L.D. Protection of steel with a superhydrophobic coating in an atmosphere with a high content of aggressive components // Corrosion: materials, protection. 2021. No. 9. pp. 33-38.
12. Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Kuryato N.A., Dorokhov A.V., Uryadnikov A.A., Dorokhova A.N. Anti-corrosion properties of superhydrophobic coatings on copper obtained by electrodeposition // Corrosion: protection, materials. Supplement to the journal "Technology of Metals". 2023. No. 13. P. 4-12.
13. Kuryato N.A., Knyazeva L.G., Dorokhov A.V., Bryksina V.A. Anti-corrosion protection of steel with compositions based on bitumen primer // Science in Central Russia. 2023. No. 5(65). pp. 112-118.
14. Knyazeva L.G., Dorokhov A.V., Kuryato N.A. Towards the assessment of inhibitor protection of agricultural machinery and equipment // Science in Central Russia. 2023. No. 1(61). pp. 133-146.
15. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Ostrikov V.V., Petrashev A.I. Properties of Petroleum and Synthetic Oils as Bases for Anticorrosion Materials // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2019. T. 55. No. 4. P. 412-423.
16. Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Dorokhov A.V., Kuryato N.A. Oil compositions modified with a volatile inhibitor to protect metals from atmospheric corrosion // Corrosion: materials, protection. 2022. No. 6. P. 29-37

17. Knyazeva L.G., Dorokhov A.V., Kuryato N.A., Prokhorenkov V.D. Study of the effectiveness of compositions based on CORTEC VpCI-368 and CORTEC VpCI-369 for anti-corrosion protection of agricultural machinery // Science in Central Russia. 2019. No. 5. P. 69-80.

18. Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Dorokhov A.V., Kur`yato N.A. Protective efficiency of oil compositions with Cortec VpCI-368D // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2021. Vol. 10, no. 2. P. 551-561.

Информация об авторах

Н.А. Курьято – младший научный сотрудник; Л. Г. Князева – доктор химический наук, доцент, главный научный сотрудник; А.В. Дорохов – кандидат химических наук, старший научный сотрудник; В. А. Брыксина – младший научный сотрудник.

Information about the authors

N. Kur`yato – junior researcher; L. Knyazeva – doctor of science (chemistry), associate professor, chief researcher; A. Dorokhov – candidate of chemical science, senior researcher; V. Bryksina – junior researcher.

Вклад авторов все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 03.04.2024 Принята к публикации (Accepted): 24.04.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.365.34
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-98-105

ВЫБОР МОДЕЛИ И АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЕТЕКЦИИ КОРНЕПЛОДОВ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ

Данила Александрович Николукин¹, Владимир Евгеньевич Петерс²,
Михаил Александрович Попов³, Андрей Владиленович Крищенко⁴

^{1,2} Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация
^{1,2,3,4} Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и
нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Российская Федерация

¹JeyViJey@mail.ru, ¹<https://orcid.org/0009-0008-4860-677X>

²<https://orcid.org/0009-0000-1066-6752>

Автор ответственный за переписку: Данила Алексеевич Николукин, JeyViJey@mail.ru
Corresponding author: Danila Nikoluykin, JeyViJey@mail.ru

Реферат. Среди методов долгосрочного хранения корнеплодов сахарной свёклы рассматривается использование системы технического зрения, направленное на обеспечение большей сохранности сырья в период его уборки и хранения путём анализа прибывающего на заводы сырья. В работе рассмотрен процесс распределения грузовых автомашин на приёмном пункте сахарных заводов человеком. Целью статьи является разработка метода детекции корнеплодов сахарной свёклы на изображении поверхности насыпи грузовой автомашины на приёмном пункте сахарных заводов. Методом распознавания сырья выбрана нейронная сеть в связи с чрезвычайно разнообразными получаемыми изображениями, с чем не справится распознавание с помощью порогового преобразования. Рассмотрены алгоритмы (такие варианты, как SSD, YOLO, R-CNN) и архитектуры (такие варианты, как AlexNet, VGGNet, GoogleNet, ResNet) различных нейронных сетей. Выявлена наиболее подходящая под необходимые задачи нейронная сеть. Определён оптимальный размер базы данных для обучения. В результате обучения и тестирования нейронной сети, выявлена необходимость в создании дополнительных фильтров. Созданы и описаны фильтры, уточняющие работы нейронной сети: отсеивающие “слипшиеся” объекты, объекты с низкой принадлежностью классу, объекты с невозможной площадью (чересчур маленькой или большой), а также с соотношением сторон менее 0,2 или более 5. По результатам выполненной работы была обучена нейронная сеть, способная находить на поступающих изображениях достаточное количество корнеплодов сахарной свёклы и удовлетворяющая требованиям качественного функционирования системы технического зрения.

Ключевые слова: сахарная свекла, хранение, размер корнеплода сахарной свеклы, машинное зрение, кагат.

CHOOSING A NEURAL NETWORK MODEL AND ARCHITECTURE FOR A TECHNICAL VISION SYSTEM FOR DETECTING SUGAR BEET ROOT CROPS

Danila Nikoluykin¹, Vladimir Peters², Mikhail Popov³, Andrey Kryshchenko⁴

^{1,2} Tambov State Technical University, Tambov, Russia

^{1,2,3,4} Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in
Agriculture, Tambov, Russia

¹JeyViJey@mail.ru, ¹<https://orcid.org/0009-0008-4860-677X>

²<https://orcid.org/0009-0000-1066-6752>

Abstract. The use of a technical vision system, aimed at ensuring greater safety of sugar beet roots during harvesting and storage by analyzing raw materials arriving at factories, is considered among the methods of long-term storage. The process of distribution of trucks at the receiving point of sugar

factories is considered by humans in the work. The purpose of the work is to develop a method for detecting sugar beet roots on an image of the surface of a truck embankment at the receiving point of sugar factories. A neural network was chosen as the raw material recognition method due to the extremely diverse nature of the resulting images, which recognition using a threshold transformation cannot cope with. Algorithms (options such as SSD, YOLO, R-CNN) and architectures (options such as AlexNet, VGGNet, GoogleNet, ResNet) of various neural networks are considered. The most suitable neural network for the required tasks has been identified. The optimal size of the database for training has been determined. As a result of training and testing the neural network, the need to create additional filters was identified. Filters have been created and described that clarify the work of the neural network: filtering out "stuck together" objects, objects with low class membership, objects with an impossible area (too small or large), as well as with an aspect ratio of less than 0.2 or more than 5. A neural network capable to find a sufficient number of sugar beet roots in incoming images and to meet the requirements for high-quality functioning of the technical vision system, was trained based on the results of the work performed.

Keywords: *sugar beet, storage, sugar beet root crop size, machine vision, kagat.*

Для цитирования: Николюкин Д.А., Петерс В.Е., Попов М.А., Крищенко А.В. Выбор модели и архитектуры нейронной сети для системы технического зрения детекции корнеплодов сахарной свёклы // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 98-105. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-98-105>.

For citation: Nikolyukin D., Peters V., Popov M., Kryshchenko A. Choosing a neural network model and architecture for a technical vision system for detecting sugar beet root crops. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 68(2): 98-105. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-98-105>.

Введение. В свеклосахарной отрасли Российской Федерации актуальной является задача разработки метода сортировки при формировании кагатов сахарной свеклы для долгосрочного хранения сроком более двух месяцев. В настоящее время сортирует партии сахарной свеклы человек и делает это с погрешностью из-за человеческих факторов. Точность сортировки человеком по оценочным данным составляет 50-60%. Применение системы технического зрения дает возможность идентифицировать партии сахарной свеклы на партии с крупным сырьем, и на партии с мелким сырьем и ответить на вопрос: какие партии сырья отправлять сразу на переработку, а какие лучше сначала отправить на хранения для снижения рисков потери массы и качества сахарной свеклы.

Рассмотрим процесс распределения сахарной свёклы на заводе ООО «Промсахар» Курской области. Сырьё поступает на свёклоперерабатывающий завод с полей в большегрузных автомашинах. На территории завода автомашина доставляет сырьё на приёмный пункт, где заводской персонал производит визуальную оценку загрязнённости, засоренности, крупности сырья. После анализа, автомашина отправляется на выгрузку сырья либо в оперативные кагаты, либо в кагаты длительного вентилируемого хранения (ДВХ). Процесс распределения сырья представлен на рисунке 1.

Оперативные кагаты используются для своевременной сырьевой подпитки завода. ДВХ кагаты используются в качестве резерва и состоят преимущественно из крупной сахарной свёклы. Попадание в ДВХ кагаты партий мелкой сахарной свёклы приводит к значительному сокращению хранения (с полутора месяцев до двух недель). Это связано с тем, что скопления мелкой сахарной свёклы в ДВХ кагатах образуют участки повышенной плотности, которые плохо вентилируются. В связи с этим, эти участки создают зоны самосогревания, что приводит к повышению влажности этих зон и кагата в целом. Использование системы технического зрения исключит влияние человеческого фактора (усталость, невнимательность, торопливость) на анализ сырья, улучшит процесс распределения сырья по типам кагатов за счёт применения вычислительной техники и нейронных сетей.



Рисунок 1 – Процесс распределения поступающего на завод сырья

Материалы и методы. Так как завод может работать с самого утра и до самой ночи, наличие освещения даёт системе технического зрения необходимый уровень освещения в любое время суток и в любую погоду. Таким образом, исключается возможность получить полностью тёмное изображение из-за нехватки света изображения. Примеры насыпей представлены на рисунке 2.

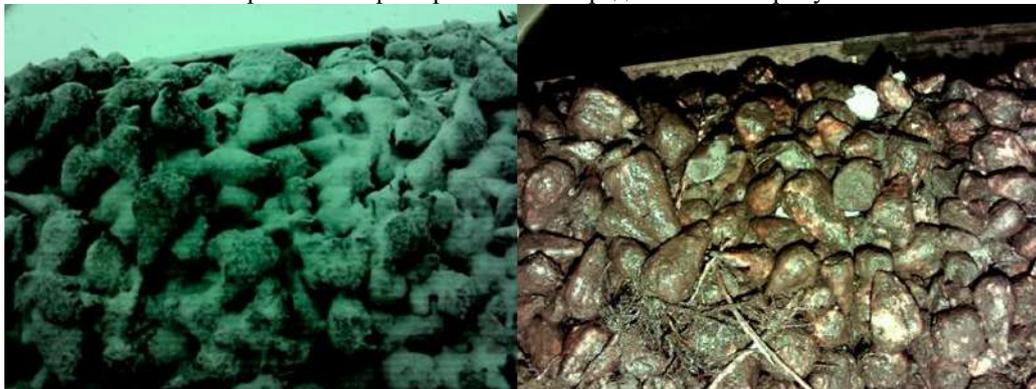


Рисунок 2 – Насыпи сахарной свеклы

В связи с чрезвычайно разнообразными погодными и временными условиями, а именно с утра до ночи, туман, снег, дождь, яркое солнце, облачная погода, использовать для детекции отдельных корнеплодов сахарной свеклы пороговое преобразование по цвету нецелесообразно и даст большую погрешность, поэтому лучше использовать нейронные сети.

Для обнаружения объектов (object detection) на изображениях широко используются алгоритмы обнаружения (детекторы), такие как SSD, YOLO, R-CNN [2].

Алгоритм R-CNN имеет точность обнаружения объекта – 58,5. Основной недостаток: медленная скорость обработки изображений. Распространенные версии: Fast R-CNN и Faster R-CNN. Принцип работы R-CNN: на изображении выделяются регионы (в конечном варианте получаются около 2000 регионов), которые предположительно содержат необходимый объект; регионы преобразуются к размеру входного слоя нейронной сети; фиксируются характеристики с

предпоследнего полносвязного слоя сети; характеристики классифицируются (SVM), и уточняется положение каждого региона на изображении (регрессия) [3].

Алгоритм YOLO имеет точность обнаружения – 63,4. Исходное изображение делится на ячейки. Если центр объекта содержится внутри определенной ячейки, то данную ячейку принимают за «главную», отражающую параметры местонахождения объекта. Каждая ячейка воспроизводит несколько вариантов нахождения ограничивающей рамки на изображении для одного и того же объекта. Данные варианты имеют определенные характеристики – координаты центра рамки, ширину и высоту рамки, степень «содержания объекта» в рамке. Последний слой используемой сети «принимает» конечное решение о количестве предсказываемых рамок ячеек и классификации объекта. Недостатки: плохое качество распознавание объекта сложной формы, группы небольших объектов [4].

Алгоритм SSD имеет точность обнаружения – 72,1. Изображения последовательно передаются на слои сверточной сети, уменьшающиеся в размерах. Выходы слоев сверточной сети каждой размерности учувствуют в детектировании, тем самым, формирую «пирамиду» изображения. Достоинства алгоритма: обнаружение объектов различных масштабов, более быстрая работа и точность обнаружения. SSD предсказывает смещение ограничивающих рамок. Рамки на разных уровнях масштабируются, размерность выходного слоя отвечает за объекты определенного масштаба. Большие объекты могут быть обнаружены на высоком уровне, маленькие – на низком [5].

Ориентируясь на вышеизложенные факты, для реализации системы технического зрения было решено использовать модель нейронной сети, предполагающую алгоритм SSD для обнаружения сложных объектов на изображениях. Теперь нужно выбрать архитектуру нейронной сети.

Архитектура сверточных сетей очень обширна. В качестве примеров, можно рассмотреть такие варианты, как AlexNet, VGGNet, GoogleNet, ResNet.

AlexNet – это одна из первых архитектур глубоких сверточных сетей. Она состоит из пяти сверточных слоев, между которыми располагаются pooling-слои и слои нормализации, и три полносвязных слоя в конце [5]. Недостатки архитектуры: AlexNet, в основном, используется в качестве основы для других новых архитектур и обладает меньшей точностью.

Архитектура VGGNet, по точности обнаружения объектов, превзошла AlexNet в 2 раза. Здесь используются большое число слоев с фильтрами меньших размеров (рисунок 18) [6].

Все ядра «conv» имеют размер 3x3, «maxpool» – 2x2 с шагом два. В этом заключается главная особенность данной архитектуры – использование ядер свертки небольших размеров, в отличие от AlexNet, что уменьшает количество обучаемых переменных. Благодаря этому, повышается устойчивость к переоснащению и обучение воспроизводится более быстро. Недостатки архитектуры: большой расход памяти.

GoogleNet – архитектура с 22 слоями. Обладает большей вычислительной способностью. GoogleNet состоит из модулей Inception, расположенных друг за другом. Имеет 5 миллионов параметров, также не содержит в себе полносвязные слои. В начале сети располагается подсеть Stem Network, в состав которой входят три сверточных слоя с двумя слоями пулинга. Модуль Inception параллельно применяет несколько фильтров на изображение, результат воздействия которых преобразуется в выходной сигнал, который перенаправляется на следующий слой [7]. Архитектура также предполагает наличие слоев с фильтром 1x1 («узкие места»), которые необходимы для уменьшения глубины изображения. GoogleNet отличается заметной эффективностью и точностью, равной 93,3 %. Однако качество данной сети существенно отличается от функционала более поздней усовершенствованной сети ResNet, с точностью 96,5 % [8].

ResNet, в отличие от GoogleNet, предполагает более 150 слоев, что делает ее в 2 раза эффективнее.

Таким образом, анализ архитектур современных нейронных сетей для распознавания объектов показал, что архитектура ResNet имеет наибольшую эффективность и была выбрана для решения поставленной задачи распознавания свеклы в насыпи кузова грузового автомобиля.

Модель выбранной для решения задачи нейронной сети носит название «SSD ResNet50», что расшифровывается как «Single-shot detector Deep residual network». Многие современные

исследования показывают, что данная модель наиболее эффективна для обнаружения объектов на изображениях при наличии небольших наборов данных. Преимуществом ResNet также могут служить «смягчение» эффекта проблемы исчезающих градиентов и улучшение точности (при свёртке глубокой сети увеличивается глубина сети и точность ухудшается).

На основе описанной выше простой сети добавлено быстрое соединение, которое превращает сеть в ее остаточную версию. Идентификационные быстрые соединения $F(x\{W\} + x)$ могут использоваться непосредственно, когда вход и выход имеют одинаковые размерности. Когда размерности увеличиваются, он рассматривает два варианта: Быстрое соединение выполняет сопоставление идентификаторов с дополнительными нулями, добавленными для увеличения размерности. Эта опция не вводит никаких дополнительных параметров. Проекция быстрого соединения в $F(x\{W\} + x)$ используется для сопоставления размерностей (выполнено с помощью 1×1 свертки). Для любой из опций, если быстрые соединения идут по картам объектов двух размерностей, они выполняются с шагом 2.

В интеллектуальной системе технического зрения принято использовать 50-слойную ResNet. В этой конфигурации сети каждый 3-слойный блок заменяется в 34-слойной сети этим 3-слойным узким местом, и в результате получается 50-слойная ResNet (рисунок 3). Они используют вариант 2 для увеличения размерностей. Эта модель имеет 3,8 миллиарда FLOPs.

layer name	output size	18-layer	34-layer	50-layer	101-layer	152-layer
conv1	112×112	7×7, 64, stride 2				
		3×3 max pool, stride 2				
conv2_x	56×56	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 64 \\ 3 \times 3, 64 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 64 \\ 3 \times 3, 64 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 64 \\ 3 \times 3, 64 \\ 1 \times 1, 256 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 64 \\ 3 \times 3, 64 \\ 1 \times 1, 256 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 64 \\ 3 \times 3, 64 \\ 1 \times 1, 256 \end{bmatrix} \times 3$
conv3_x	28×28	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 128 \\ 3 \times 3, 128 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 128 \\ 3 \times 3, 128 \end{bmatrix} \times 4$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 128 \\ 3 \times 3, 128 \\ 1 \times 1, 512 \end{bmatrix} \times 4$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 128 \\ 3 \times 3, 128 \\ 1 \times 1, 512 \end{bmatrix} \times 4$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 128 \\ 3 \times 3, 128 \\ 1 \times 1, 512 \end{bmatrix} \times 8$
conv4_x	14×14	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 256 \\ 3 \times 3, 256 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 256 \\ 3 \times 3, 256 \end{bmatrix} \times 6$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 256 \\ 3 \times 3, 256 \\ 1 \times 1, 1024 \end{bmatrix} \times 6$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 256 \\ 3 \times 3, 256 \\ 1 \times 1, 1024 \end{bmatrix} \times 23$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 256 \\ 3 \times 3, 256 \\ 1 \times 1, 1024 \end{bmatrix} \times 36$
conv5_x	7×7	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 512 \\ 3 \times 3, 512 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 512 \\ 3 \times 3, 512 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 512 \\ 3 \times 3, 512 \\ 1 \times 1, 2048 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 512 \\ 3 \times 3, 512 \\ 1 \times 1, 2048 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 512 \\ 3 \times 3, 512 \\ 1 \times 1, 2048 \end{bmatrix} \times 3$
	1×1	average pool, 1000-d fc, softmax				
FLOPs		1.8×10^9	3.6×10^9	3.8×10^9	7.6×10^9	11.3×10^9

Рисунок 3 – Сравнение конфигураций ResNet

Результаты и их обсуждение. Для обучения нейронной сети была собрана база изображений сахарной свеклы в кузове грузовых автомобилей. Количество снимков составило 258. Принимая во внимание вышеизложенное описание свойств сети ResNet, количество изображений является достаточным для обучения и для тестирования сети. На изображениях с использованием программы labeling вручную были размечены клубни сахарной свеклы. Результатом этого шага стали изображения и соответствующие им xml-файлы с размеченными данными о координатах каждого клубня.

Для процесса обучения изображения были разделены на обучающую и тестирующую выборки в соотношении 2/3 (172 изображений) и 1/3 (86 изображений) от общего количества снимков соответственно. Результаты обучения представлены на рисунке 4. Если брать большую или меньшую базу данных, результат менялся в обоих случаях в худшую сторону, поэтому принято решение оставить количество изображений таким.

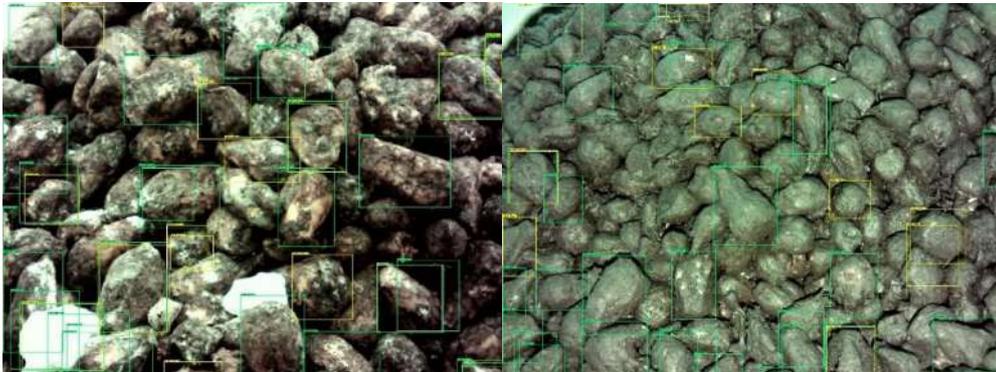


Рисунок 4 – обработанные изображения нейронной сетью

В результате обработки обученной нейронной сетью изображений получается, что некоторые корнеплоды классифицируются двумя классами (свёкла сверху и свёкла сбоку). Это сильно мешает адекватной работе системы технического зрения. Помимо этого, происходит детекция сразу двух, трёх или большего количества объектов как один. Для улучшения распознавания корнеплодов нейронной сетью необходимы дополнительные фильтры.

Фильтры работают по следующему алгоритму: удаление из массивов элементов, принадлежность к классу которых меньше 5%, определение координат двух противоположных вершин прямоугольника, ограничивающего область, содержащую корнеплод, отсеивание элементов, чьи координаты совпадают, отсеивание элементов с площадью от 500 тысяч пикселей или соотношением сторон больше 5 или меньше 0,2. Чтобы исключить наложение двух классов на один объект происходит отсеивание одного из них путём сравнения вероятности принадлежности к классу: меньшая вероятность удаляется вместе со всеми данными. Оставшийся массив считается правильным, так как больше вероятность принадлежности. Чтобы исключить идентификацию двух и более объектов за один происходит отсеивание объектов со слишком большой площадью путём сравнения площади в пикселях с фиксированным значением в 500 тысяч пикселей. Выше этого значения корнеплод даже очень крупного размера быть не может. Помимо этого, сравнивается и соотношение длины к ширине. Если соотношение больше 5 или меньше 0,2, значит этот объект отсеивается.

Применив эти фильтры, качество детекции заметно улучшилось. Примеры изображений, обработанных нейронной сетью с использованием фильтров представлены на рисунках 5 и 6.



Рисунок 5 – Обработанное нейронной сетью и фильтрами изображение

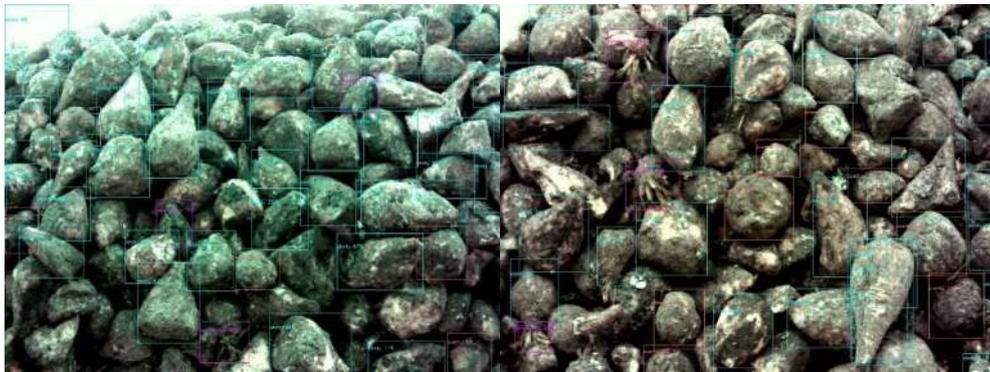


Рисунок 6 – Обработанное нейронной сетью и фильтрами изображение

По результатам использования фильтров для нейронной сети, можно сказать, что результат является удовлетворительным по сравнению с существующим процессом зрительного анализа человеком.

Заключение. В результате проведённой работы была доказана необходимость применения нейронных сетей в системе детекции корнеплодов сахарной свёклы на свеклопункте. Используя нейронные сети, можно снизить риски потери качества сахарной свёклы в период хранения.

Список источников

1. Завражных А.И. Обоснование использования машинного зрения для сортировки сахарной свёклы при хранении в кагатах / А.И. Завражных, С.М. Кольцов // Достижения науки и техники АПК. - 2022. - Т.36, №12. - С. 59 – 62.
2. Hobson Jane. Natural language processing in action / Jane Hobson, Cole Howard, Hannes Max Napke – Shelter Island, NY 11964: Manning Publications Co, 2019. – 513 с.
3. Yves Hilpisch. Artificial Intelligence in Finance. A Python-Based Guide / Hilpisch Yves – Sebastopol, CA 95472.: O’Reilly Media, 2020. – 477 с.
4. Eli Stevens. Deep Learning with PyTorch / Stevens Eli, Antiga Luca, Viehmann Thomas – Shelter Island, NY 11964: Manning Publications Co, 2020. – 522 с.
5. Paul Azunre. Transfer Learning for Natural Language Processing / Azunre Paul – Shelter Island, NY 11964: Manning Publications Co, 2021. – 266 с.
6. Oliver Durr. Probabilistic Deep Learning. With Python, Keras and TensorFlow Probability / Durr Oliver, Sick Beate, Murina Elvis – Shelter Island, NY 11964: Manning Publications Co, 2020. – 297 с.
7. Aurelien Geron. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems / Geron Aurelien – Sebastopol, CA 95472.: O’Reilly Media, 2019. – 1065 с.
8. Rishal Hurbans. Artificial Intelligence Algorithms / Hurbans Rishal – Shelter Island, NY 11964: Manning Publications Co, 2020. – 393 с.

References

1. Zavrazhnov A.I. Justification of the use of machine vision for sorting sugar beet during storage in kagats / A.I. Zavrazhnov, S.M. Koltsov // Achievements of science and technology of the agro-industrial complex. - 2022. - vol.36, No.12. – pp. 59-62.
2. Hobson Jane. Natural language processing in action / Jane Hobson, Cole Howard, Hannes Max Napke – Shelter Island, NY 11964: Manning Publications Co, 2019. – 513 с.
3. Yves Hilpisch. Artificial Intelligence in Finance. A Python-Based Guide / Hilpisch Yves – Sebastopol, CA 95472.: O’Reilly Media, 2020. – 477 с.
4. Eli Stevens. Deep Learning with PyTorch / Stevens Eli, Antiga Luca, Viehmann Thomas – Shelter Island, NY 11964: Manning Publications Co, 2020. – 522 с.

5. Paul Azunre. Transfer Learning for Natural Language Processing / Azunre Paul – Shelter Island, NY 11964: Manning Publications Co, 2021. – 266 с.

6. Oliver Durr. Probabilistic Deep Learning. With Python, Keras and TensorFlow Probability / Durr Oliver, Sick Beate, Murina Elvis – Shelter Island, NY 11964: Manning Publications Co, 2020. – 297 с.

7. Aurelien Geron. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems / Geron Aurelien – Sebastopol, CA 95472.: O'Reilly Media, 2019. – 1065 с.

8. Rishal Hurbans. Artificial Intelligence Algorithms / Hurbans Rishal – Shelter Island, NY 11964: Manning Publications Co, 2020. – 393 с.

Информация об авторах

Д.А. Николюкин – младший научный сотрудник; В.Е. Петерс – младший научный сотрудник; М.А. Попов – младший научный сотрудник; А.В. Крищенко – инженер.

Information about the authors

D. Nikol'yukin – junior researcher; V. Peters – junior researcher; M. Popov – junior researcher; A. Krischenko – engineer.

Вклад авторов все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 26.02.2024 Принята к публикации (Accepted): 12.04.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.365.34
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-106-112

ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОРНЕПЛОДОВ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ ПРИ СОРТИРОВКЕ ПЕРЕД УКЛАДКОЙ НА ХРАНЕНИЕ

Данила Александрович Николукин¹, Владимир Евгеньевич Петерс²,
Михаил Александрович Попов³, Андрей Владиленович Крищенко⁴

^{1,2} Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация
^{1,2,3,4} Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Российская Федерация

¹JeyViJey@mail.ru, ¹<https://orcid.org/0009-0008-4860-677X>

²<https://orcid.org/0009-0000-1066-6752>

Автор ответственный за переписку: Данила Алексеевич Николукин, JeyViJey@mail.ru
Corresponding author: Danila Nikoluyukin, JeyViJey@mail.ru

Реферат. Одной из проблем сахарной отрасли являются высокие потери качества корнеплодов сахарной свёклы в период хранения. Для увеличения сохранности создаются методы долгосрочного хранения сырья. Разработка системы технического зрения направлена на обеспечение большей сохранности сырья в период уборки и хранения. В работе обосновано применение методов долгосрочного хранения сахарной свёклы сроком более 2 месяцев. Установлено, что маленькие корнеплоды сильнее подвержены перепадам температур и относительной влажности окружающей среды, что приводит к изменению парциального давления водяных паров между поверхностью сахарной свёклы и окружающим её воздухом. В процессе хранения в насыпи сахарной свёклы относительная влажность воздуха достигает от 90 до 95% за счет выноса влаги с поверхности корнеплодов, что является источником потерь свекломассы. Определены критерии крупности корнеплодов сахарной свёклы. Показана необходимость создания метода сортировки грузовых автомашин на приёмном пункте сахарных заводов. Выявлено, что при определении требований к сахарной свекле, поступающей на хранение, необходимо учитывать помимо физико-химических показателей также значение параметра удельной поверхности корнеплода. Поэтому, рекомендуется отправлять в кагаты крупные корнеплоды, массой более 570 г. Сформулирована цель статьи, которая заключается в разработке программно-алгоритмического обеспечения для определения параметров корнеплодов сахарной свёклы при сортировке грузовых автомашин. Описан процесс распределения грузовых автомашин на приёмном пункте сахарных заводов человеком в настоящее время. Представлена и описана блок-схема алгоритма работы программы интеллектуальной системы технического зрения. Описаны особенности созданного программного обеспечения такие, как работа с датчиками, обработка программных или аппаратных ошибок. По результатам исследования разработан алгоритм для работы программы и программное обеспечение интеллектуальной системы технического зрения для определения параметров корнеплодов сахарной свёклы [1].

Ключевые слова: сахарная свекла, хранение, размер корнеплода сахарной свёклы, машинное зрение, кагат.

SOFTWARE AND ALGORITHMIC SUPPORT OF AN INTELLIGENT VISION SYSTEM FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF SUGAR BEET ROOT CROPS DURING SORTING BEFORE STORAGE

Danila Nikoluyukin¹, Vladimir Peters², Mikhail Popov³, Andrey Kryshchenko⁴

^{1,2} Tambov State Technical University, Tambov, Russia

^{1,2,3,4} *Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in
Agriculture, Tambov, Russia*

¹JeyViJey@mail.ru, ¹<https://orcid.org/0009-0008-4860-677X>

²<https://orcid.org/0009-0000-1066-6752>

Abstract. *The application of methods of long-term storage of sugar beet for a period of more than 2 months is justified. It has been found that small root crops are more susceptible to temperature fluctuations and relative humidity of the environment, which leads to a change in the partial pressure of water vapor between the surface of sugar beet and the surrounding air. During storage in a sugar beet mound, the relative humidity reaches from 90 to 95% due to the removal of moisture from the surface of root crops, which is a source of beet mass losses. The criteria for the size of sugar beet root crops have been determined. The necessity of creating a method for sorting trucks at the receiving point of sugar factories is shown. It was revealed that when determining the requirements for sugar beet entering storage, it is necessary to take into account, in addition to physical and chemical parameters, the value of the specific surface area of the root crop. Therefore, it is recommended to send large root crops weighing more than 570 g to kagats. The purpose of the article is formulated, which is to develop software and algorithmic support for determining the parameters of sugar beet root crops when sorting trucks. The process of distribution of trucks at the receiving point of sugar factories by man at the present time is described. A block diagram of the algorithm of the intelligent vision system program is presented and described. The features of the created software are described, such as working with sensors, processing software or hardware errors. According to the results of the study, an algorithm for the operation of the program and software of an intelligent vision system for determining the parameters of sugar beet root crops have been developed [1].*

Keywords: *sugar beet, storage, sugar beet root crop size, machine vision, kagat.*

Для цитирования: Николюкин Д.А., Петерс В.Е., Попов М.А., Крищенко А.В. Программно-алгоритмическое обеспечение интеллектуальной системы технического зрения для определения параметров корнеплодов сахарной свеклы при сортировке перед укладкой на хранение // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 106-112. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-106-112>.

For citation: Nikolyukin D., Peters V., Popov M., Kryshchenko A. Software and algorithmic support of an intelligent vision system for determining the parameters of sugar beet root crops during sorting before storage. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 68(2): 106-112. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-106-112>.

Введение. Актуальным направлением исследований, направленных на сохранность корнеплодов является совершенствование их вывоза во время уборки сахарной свеклы в условиях ограниченного приёма сахарными заводами. Ограничение приёма возникает по причине добавления квот и небольшой производительности заводов, а также недостаточной площади свеклопунктов для хранения поступивших партий сырья. Эти факторы принуждают свеклосеющие хозяйства сохранять высокий темп уборки путём организации хранения корнеплодов сахарной свёклы в полевых кагатах на полях возделывания. Это приводит к значительным потерям свекломассы. Храня сахарную свеклу в полевых кагатах, потери достигают 16% за 30 суток хранения, при этом качество хранения сильно зависит от физических показателей сахарной свёклы. Период уборки сахарной свеклы начинается с сентября и заканчивается к середине ноября. Хранится сахарная свекла в полевых кагатах до 8 недель в зависимости от способа её уборки. В начале уборки средняя продолжительность хранения в полевых кагатах доходит до 2 недель. С ноября срок хранения корнеплодов в полевых кагатах увеличивается до 8 недель, что позволяет обеспечить сахарный завод свеклосырьем вплоть до января. В настоящее время, в полевых кагатах хранится до 70% свеклосырья от общего объема переработки.

Также, снижается интенсивность перевозки свеклосырья с полей возделывания из-за неблагоприятных погодных условий, таких как обильные осадки и распутица. Погодные условия привели к снижению качества сахарной свеклы за счет развития грибковых и бактериальных

инфекций корнеплодов, что привело повышению потерь в полевых кагатах. Помимо этого, на сохранность корнеплодов при хранении существенно влияют её размеры, загрязненность, наличие зеленой массы и засоренность насыпи. Определение физических параметров корнеплодов на приёмном пункте сахарного завода позволяет корректировать направление их перевозки на хранение или сразу на переработку [2].

В результате исследования выявлено, что чем выше масса корнеплода, тем меньше его удельная поверхность. Удельной поверхностью можно назвать соотношение общей площади поверхности к массе корнеплода сахарной свёклы. На рисунке 1 показана зависимость удельной поверхности от массы корнеплодов сахарной свёклы. Из графика видно, что чем больше масса корнеплода, тем меньше его удельная поверхность.

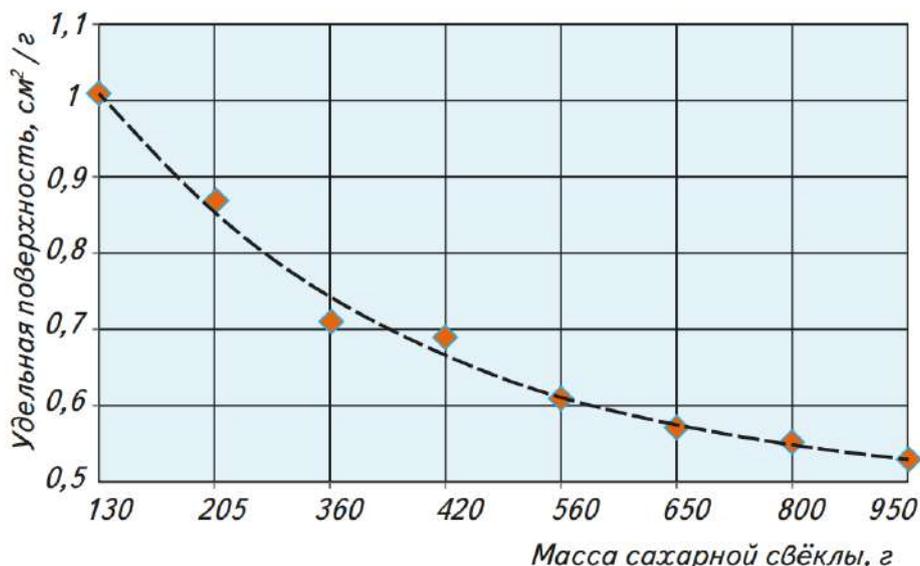


Рисунок 1 – Зависимость удельной поверхности от массы корнеплодов сахарной свёклы

Крупные корнеплоды сахарной свёклы имеют более высокую инерционность, то есть они менее подвержены влиянию факторов окружающей среды, которые приводят к изменению температуры. Наибольшее значение удельной поверхности (1,01 см² / г) у свёклы массой 130 г. Значимое снижение удельной поверхности до 0,7 см² / г происходит при увеличении массы корнеплода до 360 г. При достижении массы 560 г удельная поверхность снижается до 0,6 см² / г, а при дальнейшем увеличении массы корнеплода удельная поверхность практически не меняется. Для определения $F_{уд}$ удельной поверхности в зависимости от массы корнеплода сахарной свёклы предлагается следующее уравнение:

$$F_{уд} = 0,808 \cdot e^{-0,004 \cdot M_{св}} + 0,509,$$

где $M_{св}$ – масса корнеплода сахарной свёклы.

Определяя критерий крупности корнеплодов сахарной свёклы, предназначенных для хранения, предлагается брать в учёт значение удельной поверхности корнеплодов сахарной свёклы. Исходя из графика на рисунке 1, к мелкой свёкле предлагается относить корнеплоды массой менее 360 г, к свёкле средней крупности – 360–560 г, а к крупной от 560 г. [3].

Важной является задача создания метода сортировки при формировании кагатов сахарной свёклы для их хранения на срок двух и более месяцев. В настоящее время партии сырья сортирует человек и делает это с погрешностью из-за таких человеческих факторов как усталость,

невнимательность или торопливость. Точность сортировки человеком по оценочным данным составляет 50-60%, что приводит к слишком высокой вероятности отправки некачественного для длительного хранения сырья. Применение интеллектуальной системы технического зрения дает возможность идентифицировать партии сахарной свёклы на партии с крупной сахарной свёклой, и на партии с мелкой сахарной свёклой. Это даст возможность отправлять на долгосрочное хранение сначала партии с крупным сырьём, а с мелким отправлять сразу на переработку. Таким образом, снижаются риски потери массы и качества сахарной свёклы.

Материалы и методы. Для более точного понимания поставленной задачи рассмотрим процесс распределения сахарной свёклы на одном из заводов Курской области. Партии сырья поступают на свёклоперерабатывающий завод с полей в большегрузных автомашинах. На территории завода автомашина доставляет сырьё на приёмный пункт, где заводской персонал производит зрительную оценку качества прибывшей сахарной свёклы, а именно: её загрязнённость, засоренность, крупность. После зрительного анализа автомашину отправляют на выгрузку сырья либо в оперативные кагаты, либо в кагаты длительного вентилируемого хранения (ДВХ). Оперативные кагаты используются для своевременной сырьевой подпитки завода, в то время как ДВХ кагаты используют в качестве резерва и должны состоять преимущественно из крупной сахарной свёклы. Попадание в ДВХ кагаты партий мелкой сахарной свёклы приводит к значительному сокращению хранения с полутора месяцев до двух недель. Это связано с образованием участков повышенной плотности, которые плохо вентилируются. Из-за этого в участках скопления мелкой сахарной свёклы образуются зоны самосогревания, что приводит к повышению влажности этих зон и кагата в целом. Используя интеллектуальную систему технического зрения, можно исключить влияние человеческих факторов, таких как усталость, торопливость, невнимательность на анализ сырья и тем самым улучшить процесс распределения сырья по типам кагатов. Помимо увеличения точности, возрастёт и скорость анализа кузова. Если человек справляется со зрительным анализом в течение 2-3 минут, то система выполняет весь цикл менее, чем за минуту.

Результаты и их обсуждение. Система технического зрения работает в автономном режиме и имеет возможность самостоятельного исправления программных ошибок без участия специалиста. При возникновении программных ошибок система сбрасывает все подключенные порты и перезагружает микрокомпьютер. В системе также имеется удалённый доступ для возможности подключаться к системе на большом расстоянии, это исключит необходимость постоянного физического присутствия специалиста. Предусмотрен переход системы и в ручной режим, в котором специалист может менять или редактировать блоки функций непосредственно на самом свеклопункте. Все части алгоритма выполнены в виде отдельных функций, поэтому при необходимости их замена не составит большого труда. Не нужно менять весь алгоритм и его программную часть, достаточно лишь заменить одну функцию на другую. Программное обеспечение системы написано на языке программирования Python версии 3.7, а автоматический запуск программ выполнен с помощью консоли Linux Debian и bash-скриптов [4].

На рисунке 2 представлена блок-схема алгоритма работы программы сортировки грузовиков, прибывающих на приёмный пункт сахарного завода.

Алгоритм работает в автономном режиме, при включении контроллера. Через снятие показаний с дальномера выполнен поиск большегрузной автомашины. Поиск работает непрерывно до момента обнаружения движения грузовика. Причём функция учитывает появление в рабочей зоне легкового автомобиля или человека и не реагирует на них, а срабатывает только на грузовые автомашины.

Затем отслеживается окончательная остановка грузовика. Окончательная остановка определяется трехкратным совпадением результатов с дальномера. Это нужно для случаев, когда грузовая автомашина не выполнила остановку до конца и следствием этого полученная фотография будет смазанной.

Для повышения точности определяется дисперсия последних трех значений. Если рассчитанная дисперсия выше заданного порогового значения, замеры будут проведены заново.

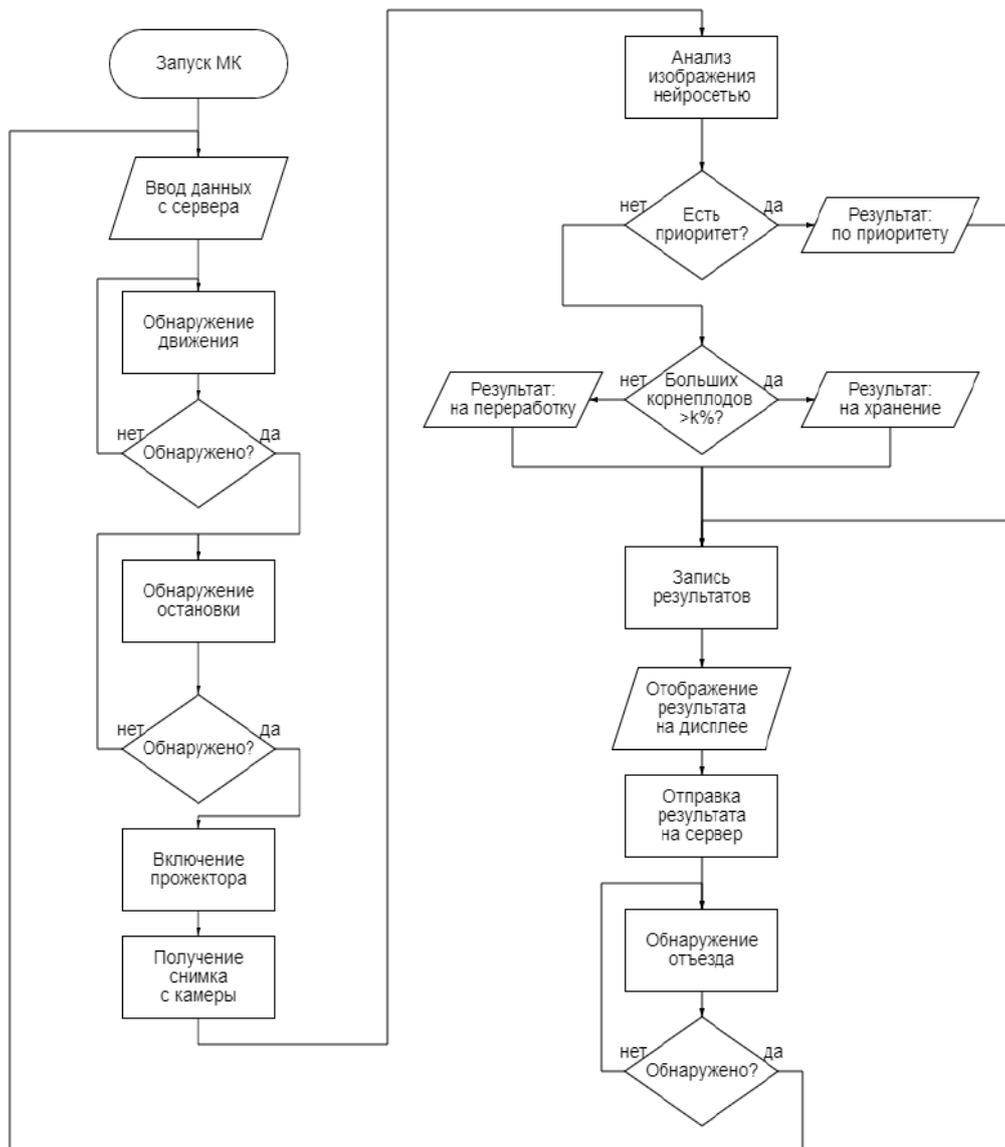


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма программы сортировки большегрузных автомашин

После успешного прохождения условия с дисперсией происходит подготовка к созданию фотографии поверхности насыпи – включается светодиодный прожектор для получения светлого и чёткого снимка в любое время и погоду. Камера работает с чётко и заранее заданными параметрами для получения одинаковых по цветопередаче изображений. После включения прожектора создаётся снимок, используемый в дальнейшей работе алгоритма.

Полученная фотография обрабатывается нейронной сетью и фильтрами для детекции корнеплодов сахарной свёклы. По окончании обработки выдаётся результат работы нейронной сети и фильтров: больше крупной свёклы – команда на хранение, большей мелкой свёклы – команда в переработку. Эта команда выводится на светодиодное табло водителю грузовика.

Все полученные данные, а именно дата и время приезда данной грузовой автомашины, расстояние до поверхности насыпи с лазерного дальномера, фотографии до и после обработки нейронной сетью и фильтрами, количество распознанных корнеплодов на снимке и их

принадлежность соответствующим фракциям записываются в файл и передаются на сервер. В случае успешной отправки на сервер этот архив удаляется с микрокомпьютера для экономии места на карте памяти, так как за производственный сезон через свеклопункт проезжает больше 5 тысяч грузовых автомашин. В случае, если отправить на сервер архив не удалось, он не удаляется до следующей итерации [5]. Бывает это при нестабильном интернет соединении или при неполадках с аппаратной либо программной частями микрокомпьютера.

В конце срабатывает поиск отъезда грузовика и если система понимает, что анализируемый грузовик отъехал, весь цикл начинается сначала. Определение отъезда необходимо в случаях, если грузовая автомашина задержалась на свеклопункте на длительное время. В ином случае, система технического зрения анализировала бы одну и ту же автомашину несколько раз.

По результатам разработанного алгоритма и программного обеспечения система технического зрения была отправлена на тестовый период на свеклопункт, чтобы проверить её на надёжность и работоспособность в автономном режиме. За 2 месяца работы успешно обработано около 5000 снимков. Примеры полученных изображений представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Обработанные нейронной сетью и фильтрами изображения

Заключение. В результате проведённой работы была обоснована необходимость применения машинного зрения на приёмном пункте сахарных заводов. Разработан алгоритм и программное обеспечение, а также проведены испытания системы технического зрения. Используя данную систему, можно снизить риски потери качества сахарной свёклы в период хранения.

Список источников

1. Завражнов А.И. Обоснование использования машинного зрения для сортировки сахарной свёклы при хранении в кагатах / А.И. Завражнов, С.М. Кольцов // Достижения науки и техники АПК. - 2022. - Т.36, №12. - С. 59 – 62.
2. Балашов А.В. Применение машинного зрения для определения размерных характеристик корнеплодов сахарной свёклы / А.В. Балашов, С.М. Кольцов // Сборник научных докладов XXII Международной научно-практической конференции. - 2023. - С. 46-50.
3. Завражнов А.И. Сортировка сахарной свёклы с применением машинного зрения как способ повышения сохранности свеклосахарного сырья / А.И. Завражнов, С.М. Кольцов // Сахар. - 2022. - №8. - С. 32-36.
4. Управление автозагрузкой в Debian [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://debian-help.ru/articles/avtozgruzka-debian/>, свободный (дата обращения 27.01.2024).
5. Итерация [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Итерация>, свободный (дата обращения 28.01.2024)..

References

1. Zavrazhnov A.I. Justification of the use of machine vision for sorting sugar beet during storage in kagats / A.I. Zavrazhnov, S.M. Koltsov // Achievements of science and technology of the agro-industrial complex. - 2022. - vol.36, No.12. – pp. 59-62.
2. Balashov A.V. The use of machine vision to determine the dimensional characteristics of sugar beet root crops / A.V. Balashov, S.M. Koltsov // collection of scientific reports of the XXII International Scientific and Practical Conference. - 2023. - pp. 46-50.
3. Zavrazhnov A.I. Sorting sugar glass using machine vision as a way to improve the safety of sugar raw materials / A.I. Zavrazhnov, S.M. Koltsov // Sugar. - 2022. - No.8. - pp. 32-36.
4. Managing startup in Debian [Electronic resource] / Access mode: <https://debian-help.ru/articles/avtozgruzka-debian/>, free (accessed 27.01.2024).
5. Iteration [Electronic resource] / Access mode: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Iteration>, free (accessed 28.01.2024)..

Информация об авторах

Д.А. Николоюкин – младший научный сотрудник; В.Е. Петерс – младший научный сотрудник; М.А. Попов – младший научный сотрудник; А.В. Крищенко – инженер.

Information about the authors

D. Nikolyyukin – junior researcher; V. Peters – junior researcher; M. Popov – junior researcher; A. Krischenko – engineer.

Вклад авторов все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 25.02.2024 Принята к публикации (Accepted): 22.04.2024

Тип статьи: научная

УДК 631.365.34

DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-113-120

РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ ЧАСТИ И 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРПУСА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОРНЕПЛОДОВ САХАРНОЙ СВЁКЛЫ

*Данила Александрович Николоюкин*¹, *Владимир Евгеньевич Петерс*²,
*Михаил Александрович Попов*³, *Андрей Владиленович Крищенко*⁴

^{1,2} Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация

^{1,2,3,4} Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и
нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Российская Федерация

¹JeyViJey@mail.ru, ¹<https://orcid.org/0009-0008-4860-677X>

²<https://orcid.org/0009-0000-1066-6752>

Автор ответственный за переписку: Данила Алексеевич Николоюкин, JeyViJey@mail.ru
Corresponding author: Danila Nikolyyukin, JeyViJey@mail.ru

Реферат. Одной из проблем сахарной отрасли являются высокие потери качества корнеплодов сахарной свёклы в период хранения. Разработка системы технического зрения направлена на обеспечение большей сохранности сырья в период уборки и хранения путём анализа прибывающего на заводы сырья. В работе описаны понятия технического зрения и системы технического зрения и входящие в неё компоненты. Рассмотрен процесс распределения грузовых автомашин на приёмном пункте сахарных заводов человеком. Сформулирована цель статьи, заключающаяся в разработке аппаратной части системы технического зрения, а также 3D-моделирование корпуса. Определены все характеристики всех комплектующих для системы технического зрения. На основании характеристик выбраны комплектующие для создания системы. Разработана и описана структурная схема системы технического зрения, включающая в себя блок питания, тумблер двухпозиционный, блок DC-DC преобразователей, блок предохранителей, контроллер, модуль-реле восьмиканальный, модуль гальванической развязки, USB-разветвитель с активным питанием, преобразователь USB-UART, прожектор, лазерный датчик расстояния, камера промышленная, USB-модем, светодиодное табло, терморегулятор, нагревательная пластина, вентилятор для корпуса, термистор. Методом 3D-моделирования является среда КОМПАС-3D, в которой были созданы такие модели, как защитный корпус системы технического зрения и кронштейн для его крепления на месте эксплуатации. Корпус напечатан из PLA-пластика, так как обладает высокими показателями твёрдости и плотности, вследствие чего вероятность поломки корпуса небольшая. Кронштейн выполнен из термически обработанной стали для высокой прочности и долговечности. По результатам выполненной работы система технического зрения была отправлена на тестирование и выявление недостатков на приёмный пункт сахарного завода в Курской области.

Ключевые слова: сахарная свекла, хранение, размер корнеплода сахарной свеклы, машинное зрение, кагат, моделирование.

HARDWARE DEVELOPMENT AND 3D MODELING OF THE BODY OF THE VISION SYSTEM FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF SUGAR BEET ROOT CROPS

*Danila Nikolyyukin*¹, *Vladimir Peters*², *Mikhail Popov*³, *Andrey Kryshchenko*⁴

^{1,2} Tambov State Technical University, Tambov, Russia

^{1,2,3,4} Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in
Agriculture, Tambov, Russia

¹JeyViJey@mail.ru, ¹<https://orcid.org/0009-0008-4860-677X>

²<https://orcid.org/0009-0000-1066-6752>

Abstract. One of the problems of the sugar industry is the high quality loss of sugar beet roots during storage. The development of a technical vision system is aimed at ensuring greater safety of raw materials during harvesting and storage by analyzing raw materials arriving at factories. The concepts of technical vision and technical vision systems and its components are described in the work. The process of distribution of trucks at the receiving point of sugar factories by humans is considered. The purpose of the article is formulated, which is to develop the hardware of the technical vision system, as well as 3D modeling of the body. All characteristics of all components for the technical vision system have been determined. Based on the characteristics, components were selected to create the system. A block diagram of a technical vision system has been developed and described, including a power supply, a two-position toggle switch, a DC-DC converter unit, a fuse block, a controller, an eight-channel relay module, a galvanic isolation module, a USB splitter with active power supply, a USB-UART converter, spotlight, laser distance sensor, industrial camera, USB modem, LED display, thermostat, heating plate, case fan, thermistor. The 3D modeling method is the KOMPAS-3D environment, in which models such as the protective housing of the technical vision system and the bracket for mounting it on site were created. The case is printed from PLA plastic, as it has high hardness and density, as a result of which the likelihood of the case breaking is low. The bracket is made of heat treated steel for high strength and durability. Based on the results of the work performed, the technical vision system was sent for testing and identification of deficiencies to the receiving point of a sugar factory in the Kursk region.

Keywords: sugar beet, storage, sugar beet root crop size, machine vision, kagat, modeling.

Для цитирования: Николюкин Д.А., Петерс В.Е., Попов М.А., Крищенко А.В. Разработка аппаратной части и 3D-моделирование корпуса системы технического зрения для определения параметров корнеплодов сахарной свёклы // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 113-120. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-113-120>.

For citation: Nikolyyukin D., Peters V., Popov M., Kryshchenko A. Hardware development and 3D modeling of the body of the vision system for determining the parameters of sugar beet root crops. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 68(2): 113-120. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-113-120>.

Введение. Техническое зрение – это применение компьютерного зрения для промышленности и производства. Областью интереса технического зрения, как инженерного направления, являются цифровые устройства ввода/вывода и компьютерные сети, предназначенные для контроля производственного оборудования. Техническое зрение является подразделом инженерии, связанным с вычислительной техникой, оптикой, машиностроением и промышленной автоматизацией. Одно из наиболее распространенных приложений технического зрения — инспекции промышленных товаров, таких как полупроводниковые чипы, автомобили, продукты питания и лекарственные препараты. Люди, работавшие на сборочных линиях, осматривали части продукции, делая выводы о качестве исполнения. Техническое зрение используется для контроля объектов, систем безопасности в промышленных условиях, мелкой автоматизации, крупного промышленного производства, контроль качества.

Система технического зрения (СТЗ) – это специальное сенсорное устройство, обеспечивающее обнаружение, автоматический анализ и контроль объектов по их изображениям. СТЗ для этих целей используют цифровые интеллектуальные камеры, а также программное обеспечение, обрабатывающее изображение для выполнения аналогичных проверок [1]. СТЗ включает в себя следующие компоненты и работает по алгоритму: аналоговая или цифровая камера, интерфейс, позволяющий обработать изображения, контроллер, программное обеспечение, источники освещения, датчик синхронизации, приводы.

Датчик синхронизации определяет исследуемый объект в рабочей области камеры и запускает её для совершения снимка. При необходимости, съёмка синхронизируется с импульсом освещения, для получения более чёткого снимка. Изображение с камеры попадает в захватчик кадров – устройство оцифровки, преобразующее выходные данные в цифровой формат. Программное обеспечение, установленное на контроллере, обрабатывает изображение и получает

необходимые параметры. На основании полученных параметров, программное обеспечение подаёт сигнал на задуманное разработчиком действие.

Материалы и методы. Для лучшего понимания поставленной задачи рассмотрим процесс распределения сахарной свёклы на заводе ООО «Промсахар» Курской области. Сырьё поступает на свёклоперерабатывающий завод с полей в большегрузных автомашинах. На территории завода автомашина доставляет сырьё на приёмный пункт, где заводской персонал производит визуальный оценку загрязнённости, засоренности, крупности сырья. После анализа, автомашина отправляется на выгрузку сырья либо в оперативные кагаты, либо в кагаты длительного вентилируемого хранения (ДВХ). Оперативные кагаты используются для своевременной сырьевой подпитки завода. ДВХ кагаты используются в качестве резерва и состоят преимущественно из крупной сахарной свёклы. Попадание в ДВХ кагаты партий мелкой сахарной свёклы приводит к значительному сокращению хранения (с полутора месяцев до двух недель). Это связано с тем, что скопления мелкой сахарной свёклы в ДВХ кагатах образуют участки повышенной плотности, которые плохо вентилируются. В связи с этим, эти участки создают зоны самосогревания, что приводит к повышению влажности этих зон и кагата в целом. Использование системы технического зрения исключит влияние человеческого фактора (усталость, невнимательность, торопливость) на анализ сырья, улучшит процесс распределения сырья по типам кагатов за счёт применения вычислительной техники и нейронных сетей.

Результаты и их обсуждение. Интеллектуальная система технического зрения по определению параметров насыпи сахарной свёклы в кузове большегрузных автомашин при распределении по типам кагатов на приёмном пункте включает в себя микроконтроллер, дальномер, источники освещения, RGB камеру.

Для разработки структурной схемы и моделирования корпуса, необходимо выбрать оборудование для системы технического зрения. Определим специфику работы контроллера. К контроллеру будут подключены промышленная камера, датчик расстояния, источник освещения. Программное обеспечение задействует до трёх гигабайт оперативной памяти. Поэтому, в системе используется микрокомпьютер Raspberry Pi 4 model B.

Определим тип дальномера, подходящий для решения следующих задач. В системе технического зрения дальномер имеет две задачи – определять объект измерения в зоне действия СТЗ и измерять расстояние до насыпи сахарной свёклы. Рассмотрим два типа дальномеров – лазерный и ультразвуковой [2]. Ультразвуковой дальномер не подходит, так как его погрешность измерения достигает нескольких сантиметров, что негативно отразится на измеренном расстоянии. Также ультразвуковой дальномер нестабилен в плохую погоду (ветер, дождь, снег). В свою очередь, лазерный датчик расстояния имеет погрешность измерения от 0,5 до 1 мм, что не существенно повлияет на измеренное расстояние. Лазерный дальномер стабильнее работает в непогоду, на измеренное расстояние могут повлиять только капли дождя. Таким образом, выберем лазерный тип дальномера. Выберем лазерный датчик расстояния LDB6 X6N3. В комплекте с датчиком находится преобразователь USB-UART RS232 FTDI.

Фактором, влияющим на степень достоверности анализа машинного зрения, является уровень освещённости насыпи свёклы. В течение рабочей смены естественное освещение не стабильно, что может приводить к искажению результатов. Для снижения влияния данного фактора в СТЗ предусмотрено искусственное освещение. Оно состоит из одного или нескольких прожекторов. Определим тип прожектора [3]. К распространённым типам прожекторов относятся: галогенные, натриевые и светодиодные.

Выберем светодиодный прожектор, который является более надёжным, производительным и универсальным в сравнении с другими типами прожекторов.

Определим технические характеристики прожектора. Высота расположения прожектора над землёй составляет 8 метров. В момент съёмки сырья в кузове большегруза, расстояние от прожектора до кузова составляет от 3 до 4 метров. Площадь, которую должен осветить прожектор составляет 20 квадратных метров, при этом уровень освещённости должен входить в интервал от 100 до 300 Лк. Для освещения всей насыпи в кузове автомашины угол рассеивания прожектора должен равняться от 100 до 130°. Прожектор должен иметь защиту от влаги и пыли, что

соответствует классу IP65. В таблице 1 приведено соотношение мощности, освещенности и расстояния для светодиодного прожектора.

Таблица 1 – Соотношение мощности, освещенности и расстояния для светодиодного прожектора [4]

Мощность прожектора, Вт	Световой поток, Лм	Высота расположения, м
10	900	2,5
20	1500	3
30	2500	4
50	4500	6
100	9000	14
120	10800	15,5
150	13500	18

Выберем прожектор мощностью 50 Вт фирмы Gauss. Рассчитаем для него уровень освещенности по формуле [5]

$$L = J/S,$$

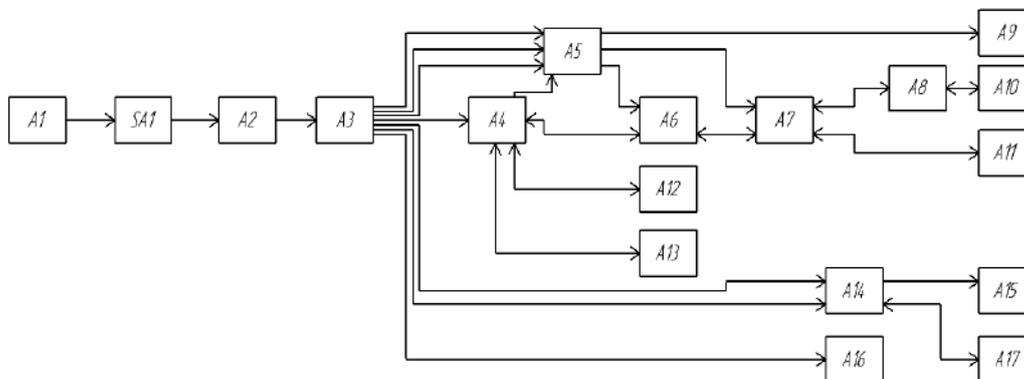
где L – уровень освещенности, Лк;
 J – световой поток, Лм;
 S – площадь освещаемой поверхности, м².

Получим уровень освещенности для выбранного прожектора, равный 175 Лк.

В разрабатываемой системе технического зрения светодиодный прожектор включается во время съёмки кузова большегруза, в остальное время он отключен. В связи с этим, для возможности управления состоянием прожектора (включен/выключен), используем одноканальный модуль-реле SONGLE SRD-05VDC [6].

Определим требования к характеристикам камеры. Для корректного программного анализа, снимки насыпей сахарной свёклы создаются в высоком разрешении. Сырьё в кузовах автомашин лежит неравномерно, поэтому, во избежание расфокусировки, камера имеет возможность ручного регулирования фокусного расстояния. Камера имеет поддержку операционной системы Linux и поддержку компьютера Raspberry Pi. Для возможности непосредственного подключения камеры к контроллеру, она обладает интерфейсом USB3.0. Осуществление бесперебойной работы при температуре от минус 15 до плюс 30 °С. Исходя из обозначенных критериев, рассмотрим камеру Sony IMX179 Industrial USB 8mp с 5-50 мм варифокальным объективом CS. Эта камера имеет датчик IMX179, 8 мегапикселей для четкого изображения и точной цветопередачи. Максимальное разрешение камеры – 3264×2448. Камера имеет совместимость с Linux и Raspberry Pi, поддерживает протокол OTG. В комплекте с ней находится объектив с переменным фокусным расстоянием 5-50 мм. Данный объектив имеет ручную настройку фокусировки и диафрагмы.

Для исключения затухания USB-сигналов с камеры и дальномера в системе технического зрения, используем USB-разветвитель с активным питанием TP-LINK UH700. Для данных комплектующих в системе технического зрения разработана структурная схема, представленная на рисунке 1.



A1 – блок питания 24 В; SA1 – тумблер двухпозиционный;
A2 – блок DC-DC преобразователей; A3 – блок предохранителей; A4 – контроллер;
A5 – модуль-реле восьмиканальный; A6 – модуль гальванической развязки;
A7 – USB-разветвитель с активным питанием; A8 – преобразователь USB-UART;
A9 – прожектор 50 Вт; A10 – лазерный датчик расстояния; A11 – камера промышленная; A12 –
USB-модем; A13 – светодиодное табло; A14 – терморегулятор; A15 – нагревательная пластина;
A16 – вентилятор для корпуса; A17 – термистор

Рисунок 1 – Структурная схема системы технического зрения

Контроллер A4 посылает команду для периодического проведения замеров расстояния дальномером A10. В случае обнаружения большегрузной автомашины, измеряемое расстояние сокращается, микроконтроллер замыкает модуль-реле A5 для включения прожектора A9, после чего происходит фотосъемка поверхности насыпи в кузове камерой A11. На основании полученной информации происходит обработка данных и определение принадлежности исследуемого сырья (сахарной свёклы) к одному из нескольких классов («Преобладает крупная сахарная свёкла», «Преобладает мелкая сахарная свёкла»). Обработанные данные поступают на автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора. После определения параметров сырья в кузове, на светодиодном табло A13 появляется надпись, о рекомендации отправить партию сырья «В ПЕРЕРАБОТКУ», если партия сахарной свёклы мелкая, или на «ХРАНЕНИЕ», если партия сахарной свёклы крупная.

Также, для системы технического зрения была разработана 3D-модель защитного корпуса, представленная на рисунке 2. Все 3D-модели элементов корпуса сделаны в программе КОМПАС 3D.

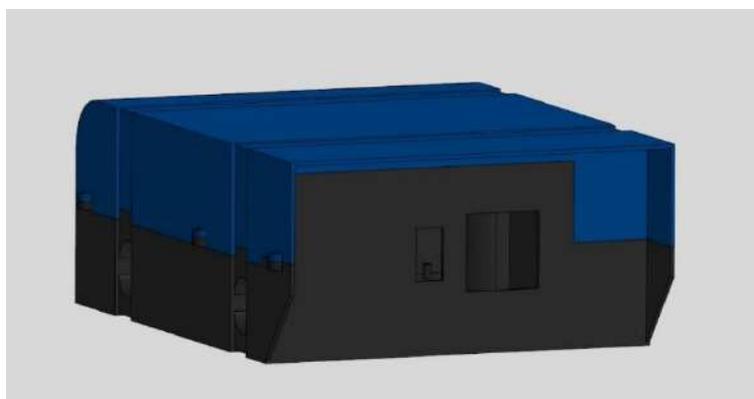


Рисунок 2 – 3D-модель защитного корпуса системы технического зрения

Корпус распечатан на 3D принтере из PLA пластика. Это связано с тем, что PLA пластик является самым твёрдым и плотным. Изделия, напечатанные из PLA пластика обладают высокой прочностью и оказывают стойкое сопротивление в попытке их согнуть и деформировать.

Для данного корпуса смоделирован кронштейн, представленный на рисунке 3, через который система будет прикрепляться на приёмный пункт сахарного завода.

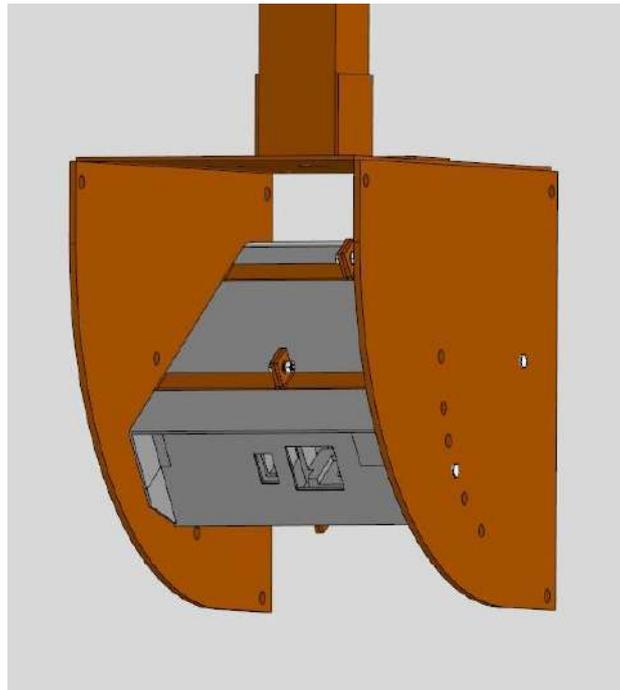


Рисунок 3 – Система технического зрения с кронштейном

Кронштейн сделан из стали. Она обеспечивает прочность, устойчивость к механическим воздействиям и долговечность. Кроме того, для увеличения её прочностных свойств сталь была подвергнута термической обработке.

Защитный корпус в лаборатории и его содержание представлено на рисунке 4.

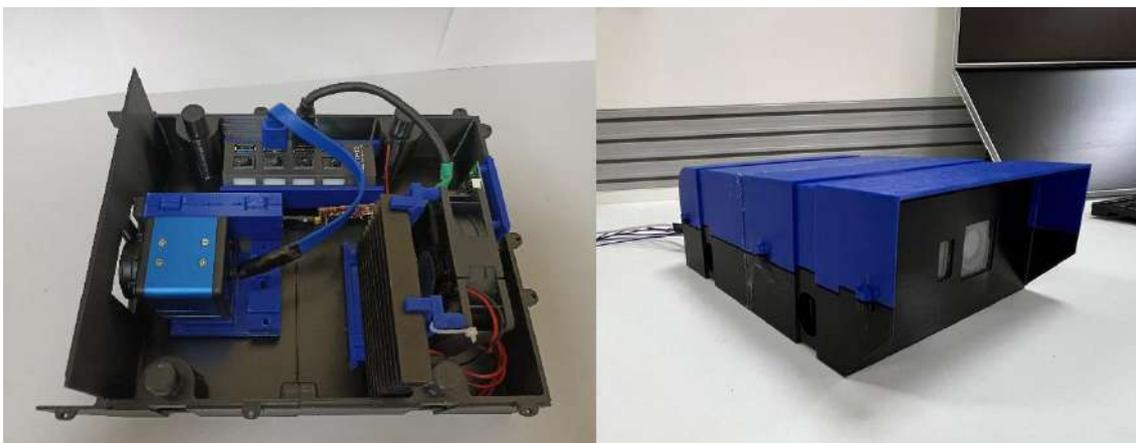


Рисунок 4 – Защитный корпус системы технического зрения

Созданная система технического зрения была отправлена на испытания на приёмный пункт сахарного завода в Курской области. Система отработала 2 месяца и успешно была возвращена на доработку.



Рисунок 5 – Защитный корпус системы технического зрения на приёмном пункте сахарного завода

Заключение. В результате проведённой работы был сделан и обоснован выбор оборудования для системы технического зрения. Была разработана аппаратная часть системы технического зрения и смоделированы защитный корпус и кронштейн, а также проведены испытания системы технического зрения. Делая выводы, данное решение будет практически для использования на приёмных пунктах сахарных заводов и способствует снижению рисков потери качества сахарной свёклы в период хранения.

Список источников

1. Сырякин, В.И. Системы технического зрения / В.И. Сырякин, В.С. Титов // РАСКО. 1992. – 370 с.
2. Дальномеры: нюансы выбора между ультразвуковым и лазерным [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.metronx.ru/articles/dalnomery-nyuansy-vybora-mezhdu-ultrazvukovym-i-lazernym/>, свободный (дата обращения 27.01.2024).
3. Полный обзор всех типов прожекторов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ksosvet.ru/blog/vidy-prozhektorov-i-v-chem-ih-otlichie-ot-obychnyh-svetilnik/>, свободный (дата обращения 28.01.2024).
4. Правильный выбор светодиодного прожектора [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://svetoprof.ru/blog/pravilnyy_vybor_svetodiodnogo_prozhektora/, свободный (дата обращения 28.01.2024).
5. Гоман, В.В. Проектирование и расчёт систем искусственного освещения. Уч. пособие / В.В. Гоман, Ф.Е. Тарасов – Екатеринбург: УрФу, 2013 – 76 с.
6. Релейный модуль 1 канал 5v схема [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://remnabor.net/releyniy-modul-1-kanal-5v-shema/>, свободный (дата обращения 28.01.2024).

References

1. Syryamkin, V.I. Systems of technical vision / V.I. Syryamkin, V.S. Titov // RASKO. 1992. – 370 p.
2. Rangefinders: the nuances of choosing between ultrasonic and laser [Electronic resource]. Access mode: <https://www.metronx.ru/articles/dalnomery-nyuansy-vybora-mezhdu-ultrazvukovym-i-lazernym/>, free (accessed 01/27/2024).
3. A complete overview of all types of searchlights [Electronic resource]. Access mode: <https://ksosvet.ru/blog/vidy-prozhektorov-i-v-chem-ih-otliche-ot-obychnyh-svetilnik/>, free (accessed 28.01.2024).
4. The right choice of LED floodlight [Electronic resource]. Access mode: https://svetoprof.ru/blog/pravilnyy_vybor_svetodiodnogo_prozhektora/, free (accessed 28.01.2024).
5. Homan, V.V. Design and calculation of artificial lighting systems. Textbook / V.V. Homan, F.E. Tarasov – Yekaterinburg: UrFU, 2013 – 76 p.
6. Relay module 1 channel 5v circuit [Electronic resource]. Access mode: <https://remnabor.net/releyniy-modul-1-kanal-5v-shema/>, free (accessed 28.01.2024).

Информация об авторах

Д.А. Николюкин – младший научный сотрудник; В.Е. Петерс – младший научный сотрудник; М.А. Попов – младший научный сотрудник; А.В. Крищенко – инженер.

Information about the authors

D. Nikolyukin – junior researcher; V. Peters – junior researcher; M. Popov – junior researcher; A. Krischenko – engineer.

Вклад авторов все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 26.02.2024 Принята к публикации (Accepted): 23.04.2024

Тип статьи: научная
УДК 62-233.132
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-121-129

РЕМОНТ КОРЕННЫХ И ШАТУННЫХ ШЕЕК КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ДИСКРЕТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

*Дмитрий Владимирович Доровских*¹, *Юрий Евгеньевич Глазков*²,
*Никита Алексеевич Шуваев*³

^{1,2,3} Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация
¹dima.dorovskikh@yandex.ru, ²glazkov_yural@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Владимирович Доровских,
dima.dorovskikh@yandex.ru

Corresponding author: Dmitry Dorovskikh, dima.dorovskikh@yandex.ru

Реферат. Выполнены исследования по оценке влияния дискретного упрочнения шеек коленчатого вала на его усталостную прочность. Для этого были проведены испытания на усталость двух контрольных частей коленчатого вала типа Д80. Установлено, что разрушение контрольной части №1 произошло после 322000 циклов, контрольной части №2 - после 201000 циклов. Зона разрушения обеих контрольных частей проходит по переходной галтели R8 мм шатунных шеек. Это позволяет сделать вывод, что фактор дискретного упрочнения не связан с усталостным разрушением контрольных частей. С целью определения ресурса коленвала двигателя КамАЗ-740, упрочненного дискретным способом (вал четвертого ремонтного размера), он был установлен на автомобиль КамАЗ-5320. В результате проведенных испытаний было установлено, что за весь цикл тестирования пробег автомобиля составил 109000 км. При этом на момент завершения испытаний все параметры двигателя автомобиля соответствовали техническим требованиям. Автомобиль КамАЗ-5320 находится в эксплуатации до настоящего времени. Его пробег составил 269000 км без остановки на капитальный ремонт. Для проведения эксплуатационных испытаний чугунового коленчатого вала с дискретным упрочнением, двигателя типа Д80, был взят двигатель дизель - генератора 1Д80Б, который после сборки подвергли полномасштабным испытаниям. Данные испытания включали в себя 100-часовую обкатку двигателя, определение уровня вибрации и амплитуд крутильных колебаний валопровода дизель - генератора в рабочем диапазоне оборотов. Проведенный анализ вибрационного состояния двигателя показал, что на всех режимах испытаний уровень вибрации в исследуемых точках не превышает норм (0,350 мм на корпусе турбокомпрессора и 0,150 мм на лапе генератора). Максимальные напряжения от крутильных колебаний составили: 8 порядок - 17,5 МПа; 4, 5 порядок - 10,5 МПа; 1, 5 порядок - 10,0 МПа. Полученные уровни напряжений значительно ниже допустимых. Проведенные испытания дизель-генератора 1Д80Б показали полное его соответствие техническим требованиям на эксплуатацию данного двигателя.

Ключевые слова: дизель, ремонт, коленчатый вал, дискретное упрочнение, испытания.

REPAIR OF MAIN AND CONNECTING ROD JINS OF DIESEL ENGINE CRANKSHAFTS USING DISCRETE HARDENING

¹Dmitriy Dorovskikh, ²Yurij Glazkov, ³Nikita Shuvaev

^{1,2,3} Tambov state technical university, Tambov, Russia
¹dima.dorovskikh@yandex.ru, ²glazkov_yural@mail.ru

Abstract. Studies to assess the effect of discrete hardening of the crankshaft journals on its fatigue strength have been carried out. For this purpose, fatigue tests were carried out on two control parts of the D80 type crankshaft. It was established that the destruction of control part No. 1 occurred after 322,000 cycles, control part No. 2 after 201,000 cycles. The destruction zone of both control parts passes

along the R8 mm transition fillet of the connecting rod journals. This allows us to conclude that the discrete hardening factor is not associated with fatigue failure of the control parts. In order to determine the service life of the crankshaft of the KamAZ 740 engine, strengthened in a discrete way (shaft of the fourth repair size), it was installed on a KamAZ 5320 vehicle. As a result of the tests, it was found that during the entire testing cycle the vehicle's mileage was 109,000 km. Moreover, at the time of completion of the tests, all parameters of the car's engine met the technical requirements. The KamAZ 5320 vehicle is in operation to this day. Its mileage was 269,000 km without stopping for major repairs. To conduct operational tests of a cast iron crankshaft with discrete hardening of a D80 type engine, a 1D80B diesel generator engine was taken, which after assembly was subjected to full-scale testing. These tests included a 100-hour engine run-in, determination of the vibration level and amplitudes of torsional vibrations of the diesel generator shaft line in the operating speed range. The analysis of the vibration state of the engine showed that in all test modes the vibration level at the points under study does not exceed the norms (0.350 mm on the turbocharger housing and 0.150 mm on the generator foot). The maximum stresses from torsional vibrations were: 8, about 17.5 MPa; 4, 5 order 10.5 MPa; 1.5 order 10.0 MPa. The resulting stress levels are significantly lower than permissible. Tests of the 1D80B diesel generator showed its full compliance with the technical requirements for the operation of this engine.

Keywords: diesel, repair, crankshaft, discrete hardening, testing.

Для цитирования: Доровских Д.В., Глазков Ю.Е., Шуваев Н.А. Ремонт коренных и шатунных шеек коленчатых валов дизельных двигателей при помощи дискретного упрочнения // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 121-129. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-121-129>.

For citation: Dorovskikh D., Glazkov Yu., Shuvaev N. Repair of main and connecting rod jins of diesel engine crankshafts using discrete hardening. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 68(2): 121-129. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-121-129>.

Введение. Выбор материалов традиционной номенклатуры при изготовлении и ремонте контактирующих пар кривошипно-шатунного механизма дизельных двигателей может оказаться малоэффективным. Повышение требований к эксплуатационным характеристикам деталей агрегатов и узлов накладывают ограничения при проведении их ремонта.

Способы упрочнения, применяемые при ремонте коренных и шатунных шеек коленвалов имеют следующие недостатки[1]:

- известные способы упрочнения и нанесения износостойких покрытий могут не обеспечивать одновременно требуемой износостойкости и усталостной прочности деталей;
- не обеспечивается качественное сцепление упрочняющего покрытия с восстанавливаемой деталью;
- высокая энергоемкость процесса упрочнения;
- возникновение деформации восстанавливаемой детали после упрочнения, что требует увеличения величины припусков под механическую обработку;
- организация производственного процесса требует значительных капитальных затрат и устранения вредного воздействия на окружающую среду.

Таким образом, известные способы упрочнения имеют ограничения, что не позволяет получить удовлетворительный уровень эксплуатационных характеристик восстановленных деталей в сочетании с достаточной технологичностью и экономичностью процессов ремонта.

В последние десятилетия развиваются новые способы восстановления, которые способствуют повышению прочностных характеристик и износостойкости отремонтированных деталей.

Метод электроискрового легирования является одним из перспективных. Его сущность заключается в переносе металла в момент искрового разряда с анода на катод. При переносе металла в момент разряда, так же происходит макролегирование поверхностной зоны детали. Это способствует изменению физико-механических свойств и химического состава материала восстанавливаемой детали в области пятна контакта с электродом.

Процесс электроискрового легирования имеет ряд особенностей[2]:

- перенос материала зависит от эрозионной стойкости анода и катода;

- ограничения по глубине и толщине легированного слоя;
- возможно образование каверн и других дефектов на поверхности;
- шероховатость поверхности, после обработки, может не соответствовать требованиям;
- высокая трудоемкость процесса.

Ввиду указанных особенностей, электроискровое легирование имеет узкую область применения. Чаще всего там, где нет высоких требований к качеству поверхности и износостойкости[3].

Материалы и методы.

С целью технологической адаптации способа дискретного упрочнения шеек коленчатых валов двигателей типа Д80, 5Д49, КамАЗ-740 и определения влияния масштабного фактора на качество упрочнения были выполнены дополнительные исследования.

Для этого были проведены испытания на усталость двух отдельных (контрольных) частей коленчатого вала типа Д80, которые были вырезаны из целого образца вала. Контрольная часть №1, с коренными шейками 8, 9, 10, 11 и шатунными шейками 8, 9, 10. Контрольная часть №2, с коренными шейками 4, 5, 6, 7 и шатунными 4, 5, 6. Коренные и шатунные шейки этих частей были упрочнены дискретным способом. Было проведено чистовое шлифование, восстановление масляных отверстий и полирование. Это обеспечило шероховатость рабочей поверхности шеек в пределе $Ra=0,32-0,16$ мкм в соответствии с требованиями рабочего чертежа.

Режимы дискретного упрочнения шеек контрольных частей соответствовали оптимальным, которые были определены при проведении лабораторных испытаний:

- ток разряда $I_p = 60-70$ А;
- дискретности $\varphi = 50\%-70\%$;
- толщина электрода (сталь 08Х18Н10Т) $S = 1,0$ мм.

Проведенные затем исследования упрочненных зон на шейках показали, что:

- глубина упрочнения $0,24-0,38$ мм;
- твердость упрочненной зоны (пятна) $580-680$ HV ($53,1-58,4$ HRC);
- твердость сердцевины (основного металла) $250-300$ HV ($22,1-30,2$ HRC).

Испытания контрольных частей на усталость проводились в ООО ПП «Дизельмаш», г. Мытищи. Для этого была использована универсальная испытательная машина МУП-100. Воздействие циклических нагрузжений прикладывалось к шатунным шейкам 9 (контрольная часть №1) и 5 (контрольная часть №2). Проведенное тензометрирование показало, что величина максимального нагружения - 23 МПа, коэффициент асимметрии составил $R = 0,31$.

Начало разрушения контрольных частей было установлено для:

- контрольной части №1 - после 322000 циклов;
- контрольной части №2 - после 201000 циклов.

Эти параметры соответствуют нагрузке в 21 МПа, для более мощного дизеля 10Д100 при [4,5]. Зона разрушения обеих контрольных частей проходит по переходной галтели R8 мм шатунных шеек. Это позволяет сделать вывод, что фактор дискретного упрочнения не связан с усталостным разрушением контрольных частей.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что предлагаемое упрочнение деталей не является влияющим фактором, который приводит к снижению усталостной прочности. Предлагаемую технологию можно рекомендовать для дальнейшей апробации ремонта коленвалов.

Для внедрения технологического процесса дискретного упрочнения шеек коленчатых валов двигателей типа Д80 на ООО ПП «Дизельмаш» была разработана соответствующая технологическая оснастка. Дискретное упрочнение шеек коленчатых валов производилось на станке модели РТ 11 (Рисунок 1) после предварительного шлифования.

По завершению дискретного упрочнения и выполнения всех последующих операций шейки коленчатого вала имели следующие параметры:

- зоны, образованные дискретным упрочнением, как в осевом, так и радиальном сечениях представляют собой дискретные участки различной конфигурации (дугообразные, либо прямолинейные или волнистые), в структуре этих зон четко выделяется три зоны (Рисунок 2);
- «белый» слой, практически не травящийся, расположен непосредственно у поверхности шейки и имеет глубину $0,20-0,32$ мм;

- зона «термического» влияния, расположена в сечении шейки непосредственно вслед за «белым» слоем, повторяя его конфигурацию. Характер дисперсности структуры в этой зоне отличается от дисперсности основной перлитной структуры, глубина зоны «термовлияния» составляет 0,06-0,08 мм;
- твердость основного материала составляет 215-300 HV (24-30,2 HRC), «белого» слоя 480-680 HV (46-57 HRC) и зоны «термического» влияния 400-430 HV (40,5-42,9 HRC);
- визуальный осмотр упрочненных поверхностей шеек показал отсутствие дефектов и трещин.

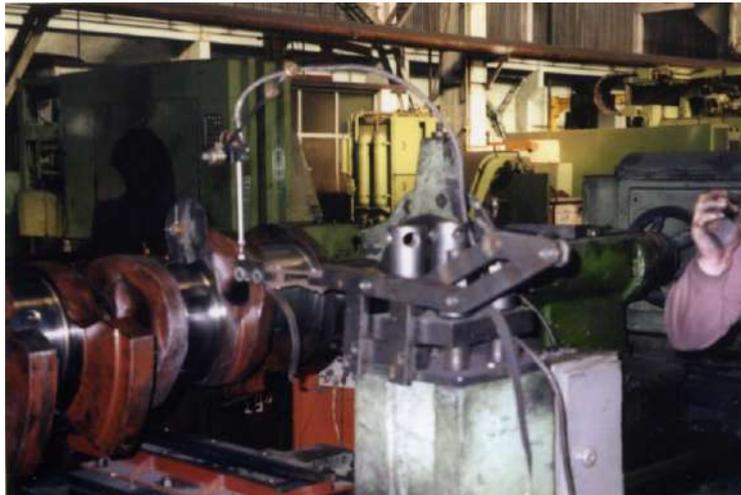
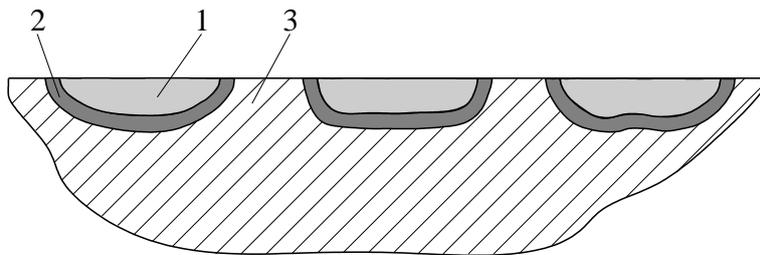


Рисунок 1 - Дискретное упрочнение коленвала двигателя типа Д80

С целью внедрения технологического процесса дискретного упрочнения шеек коленчатых валов двигателя КамАЗ-740, в ООО «4 Такта-Т» г. Тамбов были проведены опытные работы по определению припуска под чистовую шлифовку, выбору оборудования для упрочнения и разработке технологической оснастки.



1 – «белый» слой; 2 – зона термического влияния; 3 – основной материал

Рисунок 2 - Схема упрочненных зон

Для проведения испытаний был выбран коленвал четвертого ремонтного размера, который был отбракован и не подлежал восстановлению традиционными способами.

Работы выполнялись на токарном станке модели ДИП-500 с предварительной шлифовкой шеек коленвала (Рисунок 3). Было выполнено упрочнение предлагаемым способом, и все последующие операции, предусмотренные технологическим процессом ремонта.

Твердость упрочненных зон (пятен) составила:

- на рабочих поверхностях шеек 660-860 HV (57,5-65,8 HRC);
- сердцевины вала (основного металла) 380-450 HV (38,9-44,5 HRC).



Рисунок 3 - Дискретное упрочнение коленвала двигателя КамАЗ-740

Для определения влияния технологии дискретного упрочнения на детали изготовленные из стали 38 ХНЗМА (ГОСТ 4543-71), в ООО ПП «Дизельмаш» были проведены опытные работы по упрочнению коленчатых валов двигателей типа 5Д49 [6]. Эти двигатели изготавливаются АО «Коломенский завод» МО г. Коломна, при чем шейки коленчатых валов подвергаются азотированию на глубину 0,4 мм, согласно требованиям рабочего чертежа.

При поступлении данного двигателя на капитальный ремонт установлено, что после шлифования шеек коленчатого вала под второй (третий) ремонтный размер практически отсутствует упрочненный (азотированный) слой. Поэтому, для продления срока эксплуатации двигателя 5Д49 предлагается при ремонте вместо азотирования применять дискретное упрочнение шеек коленчатого вала.

Результаты и обсуждение.

С целью определения ресурса коленвала двигателя КамАЗ-740, упрочненного дискретным способом (вал четвертого ремонтного размера), он был установлен на автомобиль КамАЗ-5320. В течение периода эксплуатации автомобиль проходил все ТО согласно техническим требованиям на данный двигатель. В результате проведенных испытаний было установлено, что за весь цикл тестирования пробег автомобиля составил 109000 км. При этом на момент завершения испытаний все параметры двигателя автомобиля соответствовали техническим требованиям.

Автомобиль КамАЗ-5320 находится в эксплуатации до настоящего времени. Его пробег на 20.12.23 г. составил 269000 км (без остановки на капитальный ремонт).

Для проведения эксплуатационных испытаний чугунного коленчатого вала с дискретным упрочнением, двигателя типа Д80, был взят двигатель дизель - генератора 1Д80Б, который после сборки подвергли полномасштабным испытаниям в ООО ПП «Дизельмаш».

Данные испытания включали в себя 100-часовую обкатку двигателя, определение уровня вибрации и амплитуд крутильных колебаний валопровода дизель - генератора в рабочем диапазоне оборотов.

Замер амплитуды вибрации производился ручным вибрографом ВР-1А в вертикальном, поперечном и осевом направлениях. Обработка виброграмм производилась с помощью отсечного микроскопа МПВ-2 с 24 кратным увеличением. Амплитуда вибрации определялась при работе двигателя под нагрузкой на режимах тепловозной характеристики, соответствующих 8...15 позициям контроллера, в следующих точках:

- на лапе генератора;
- на корпусе турбокомпрессора на уровне оси ротора.

Проведенный анализ вибрационного состояния двигателя при его работе на режимах тепловозной характеристики показал, что на всех режимах испытаний уровень вибрации в

исследуемых точках не превышает норм (0,350 мм на корпусе турбокомпрессора и 0,150 мм на лапе генератора) (Таблица 1).

Таблица 1 - Максимальная амплитуда вибрации дизель - генератора 1Д80Б

№ п/п	Позиция контроллера машиниста	Частота вращения коленвала n, мин ⁻¹	Мощность N, кВт	Амплитуда вибрации, мм					
				на корпусе турбокомпрессора на уровне оси ротора			на лапе генератора		
				вертикальная	осевая	поперечная	вертикальная	осевая	поперечная
1	8	675	1080	0,122	0,135	0,193	0,102	0,050	0,143
2	9	720	1220	0,168	0,122	0,100	0,072	0,064	0,127
3	10	770	1380	0,168	0,122	0,110	0,068	0,053	0,088
4	11	815	1540	0,114	0,102	0,143	0,072	0,052	0,093
5	12	860	1685	0,214	0,143	0,110	0,050	0,043	0,093
6	13	910	1850	0,227	0,164	0,147	0,072	0,047	0,093
7	14	955	1965	0,252	0,193	0,106	0,085	0,043	0,077
8	15	1000	2075	0,343	0,239	0,135	0,072	0,052	0,097
Норма				0,350	0,350	0,350	0,150	0,150	0,150

Максимальная величина вибрации наблюдалась на корпусе турбокомпрессора в вертикальном направлении при работе двигателя на режиме полной мощности и составила 0,343 мм, что не превышает установленной нормы (0,350 мм).

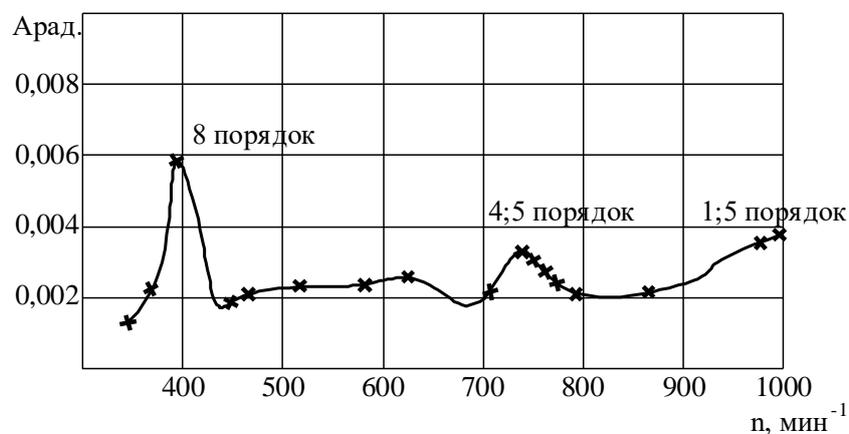
На лапе генератора в поперечном направлении наибольший уровень вибрации (0,143 мм) был зафиксирован на 8 позиции контроллера машиниста (n=875 мин⁻¹ и N=1080 кВт), что не превышает установленной нормы - 0,150 мм.

Испытания по определению амплитуды крутильных колебаний валопровода двигателя в рабочем диапазоне оборотов проводились осциллографическим методом с помощью торсиографа ТРАК-12м. Торсиографирование проводилось при непрерывном плавном изменении частоты вращения коленчатого вала при работе двигателя на холостом ходу и под нагрузкой на режимах тепловозной характеристики.

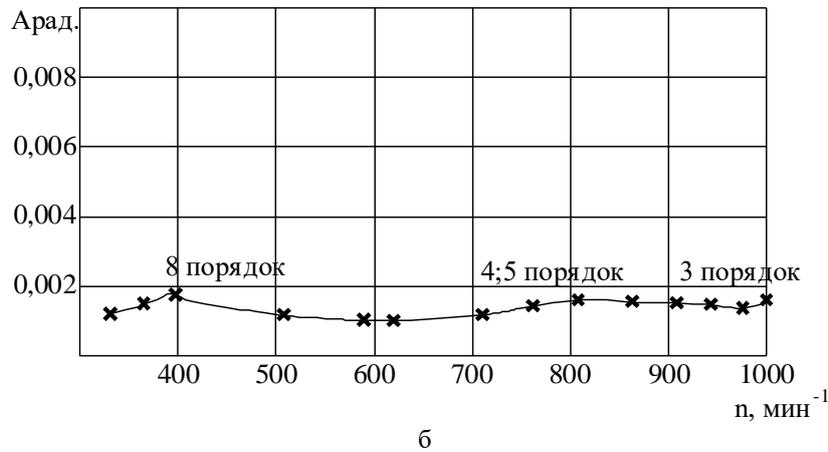
В процессе испытаний, осциллографом АКИП-4122/12 одновременно регистрировались:

- торсиограмма;
- отметки оборотов коленчатого вала;
- отметки времени 0,02 сек.

Результаты испытаний представлены в виде зависимостей (Рисунок 4).



а



а – под нагрузкой; б – холостой ход.

Рисунок 4 - Резонансные кривые крутильных колебаний переднего носка коленчатого вала

Согласно полученным результатам установлено, что при работе двигателя под нагрузкой на режимах тепловозной характеристики в рабочем диапазоне оборотов двигателя проявляются крутильные колебания коленчатого вала 4, 5 порядка с максимальными амплитудами 0,0036 рад. при 740 мин⁻¹, 8 порядка с максимальными амплитудами 0,006 рад. при 400 мин⁻¹, в зоне оборотов, близких к номинальным (900...1000 мин⁻¹) проявляются колебания 1, 5 порядка с максимальными амплитудами до 0,0035 рад. при n = 1000 мин⁻¹.

Максимальные амплитуды крутильных колебаний коленчатого вала при работе двигателя на холостом ходу оказались значительно ниже и не превышают 0,002 рад.

По расчетной формуле крутильных колебаний и полученным при торсиографировании амплитудам колебаний были определены напряжения в опасном сечении валопровода (8 шатунной шейки) по формуле (1).

$$\tau_{k1k+1} = \frac{A_1(\alpha_k - \alpha_{k+1})}{\varepsilon_{k1k+1} \cdot I_0 \cdot W_{k1k+1}}, \quad (1)$$

где τ_{k1k+1} - напряжение в опасном сочетании;

A_1 - амплитуда колебаний зафиксированная торсиграфом, рад;

$\alpha_k - \alpha_{k+1}$ - максимальная разность амплитуд колебания в относительных единицах;

ε_{k1k+1} - податливость колена в относительных единицах;

I_0 - податливость колена;

W_{k1k+1} - момент сопротивления сечения шатунной шейки.

Таким образом, максимальные напряжения от крутильных колебаний составили:

8 порядок - 17,5 МПа;

4, 5 порядок - 10,5 МПа;

1, 5 порядок - 10,0 МПа.

Данные уровни напряжений значительно ниже допустимых, которые составляют:

- для режима работы дизель-генератора при n = 400 мин⁻¹, на котором, проявляются колебания 8 порядка $\tau_{доп} = 34,0$ МПа;

- для режима n = 740 мин⁻¹ при колебаниях 4, 5 порядка $\tau_{доп} = 29,0$ МПа;

- для номинального режима n = 1000 мин⁻¹ при колебаниях 1, 5 порядка $\tau_{доп} = 25,5$ МПа.

Установлено, что уровень напряжений в коленчатом вале, полученный при торсиографировании дизель-генератора 1Д80Б, не превышает уровень однотипных с ним дизель-генераторов Д70, опыт эксплуатации которых показал достаточную, с точки зрения крутильных колебаний, надежность их валопроводов.

Таким образом, полномасштабные заводские испытания дизель-генератора 1Д80Б, оснащенного коленчатым валом с дискретным упрочнением, показали полное его соответствие техническим требованиям на эксплуатацию данного двигателя.

После завершения заводских испытаний двигатель 1Д80Б был установлен на тепловоз и направлен в эксплуатацию. При этом на 28.11.2023 г., согласно карте испытаний, после пробега тепловоза 100000 км двигатель был, подвергнут полной дефектации. Обмер коленчатого вала показал, что он находится в рабочем состоянии и износ по коренным и шатунным шейкам отсутствует. После завершения дефектации и замены изношенных деталей двигатель был установлен на тепловоз и отправлен для дальнейшей эксплуатации.

Выводы.

1. Восстановление размеров шеек коленчатого вала дискретным упрочнением не приводит к снижению усталостной прочности. Поэтому, данная технология может быть рекомендована вместо нормализации и закалки ТВЧ шеек коленвала двигателя типа Д80. При этом полученный максимальный уровень вибрации на корпусе турбокомпрессора в вертикальном направлении не превышает установленной нормы для двигателей типа Д80.

2. Установлено, что дискретное упрочнение обеспечивает упрочненный слой (в пятне) глубиной 240-380 мкм твердостью в пределах 580-680 HV (53,1-58,4 HRC);

3. Шейки коленчатых валов изготовленных из чугуна, после восстановления, имеют достаточную усталостную прочность на уровне $\sigma^{-1} \approx 195$ МПа. При этом фактор дискретного упрочнения не связан с усталостным разрушением контрольных частей, т.к. разрушение происходит по галтели R8 мм шатунных шеек;

4. Дискретное упрочнение оказывает минимальное влияние на вибрационную нагрузку, амплитуда которой во время испытаний на всех режимах не превышала 0,343мм, что находится в пределах установленной нормы (0,350 мм);

5. Установлено, что наибольшие напряжения от крутильных колебаний в коленчатом вале после дискретного упрочнения ниже допустимых в 1,8-2,4 раза.

Список источников

1. Восстановление и упрочнение изношенных деталей автомобилей нанокompозиционными гальваническими покрытиями / А. Н. Новиков, Е. В. Агеева, М. А. Зубарев, А. С. Осминина. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2018. – 160 с. – ISBN 978-5-907049-68-0. – EDN XUZWYP.

2. Верхотуров, А. Д. Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1992. – 180 с. – ISBN 5-7442-0338-9. – EDN SQLNFD.

3. Глушко, С. П. Исследование технологии электроискрового нанесения покрытий, легирования и упрочнения / С. П. Глушко // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 253-259. – DOI 10.23947/2687-1653-2021-21-3-253-259. – EDN AIFVXK.

4. Горский, В. Г. Планирование эксперимента в системах контроля качества / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер // Методы менеджмента качества. – 2019. – № 3. – С. 54-61. – EDN VVELOB.

5. Посметьев, В. И. Оценка эффективности перспективной комбинированной технологии для восстановления шеек коленчатых валов двигателей лесовозных автопоездов / В. И. Посметьев, А. М. Кадырметов, В. О. Никонов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2021. – Т. 4, № 4(38). – С. 86-101. – DOI 10.34220/2311-8873-2022-86-101. – EDN IZXVM.

6. Тищенко, А. Т. Разработка системы моделей, методов и средств для обеспечения прочности коленчатых валов транспортных дизелей: специальность 01.02.06 "Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Тищенко Алексей Тимофеевич. – Москва, 1993. – 49 с. – EDN ZJUQNB.

References

1. Restoration and strengthening of worn car parts with nanocomposite galvanic coatings / A. N. Novikov, E. V. Ageeva, M. A. Zubarev, A. S. Osminina. – Kursk: Closed Joint Stock Company "University Book", 2018. – 160 p. – ISBN 978-5-907049-68-0. – EDN XUZWYP.

2. Verkhoturov, A. D. Physico-chemical foundations of the process of electrospark alloying of metal surfaces / A. D. Verkhoturov. – Vladivostok: Dalnauka, 1992. – 180 p. – ISBN 5-7442-0338-9. – EDN SQLNFD.
3. Glushko, S. P. Research on the technology of electrospark coating, alloying and hardening / S. P. Glushko // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2021. – Т. 21, No. 3. – P. 253-259. – DOI 10.23947/2687-1653-2021-21-3-253-259. – EDN AIFVXK.
4. Gorsky, V. G. Planning an experiment in quality control systems / V. G. Gorsky, Yu. P. Adler // Methods of quality management. – 2019. – No. 3. – P. 54-61. – EDN VVELOB.
5. Posmetyev, V. I. Assessing the effectiveness of a promising combined technology for restoring the crankshaft journals of engines of timber road trains / V. I. Posmetyev, A. M. Kadyrmetov, V. O. Nikonov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2021. – Т. 4, No. 4(38). – P. 86-101. – DOI 10.34220/2311-8873-2022-86-101. – EDN IIZXVM.
6. Tishchenko, A. T. Development of a system of models, methods and means to ensure the strength of crankshafts of transport diesel engines: specialty 01.02.06 “Dynamics, strength of machines, instruments and equipment”: abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Tishchenko Alexey Timofeevich. – Moscow, 1993. – 49 p. – EDN ZJUQNB.

Информация об авторах

Д.В. Доровских – кандидат технических наук, доцент; Ю.Е. Глазков - кандидат технических наук, доцент; Н.А. Шуваев – магистрант.

Information about the authors

D. Dorovskikh - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Yu. Glazkov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; N. Shuvaev - MEng student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 10.03.2024 Принята к публикации (Accepted): 21.04.2024

Тип статьи: дискуссионная
УДК 62-233.132
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-130-140

РАССМОТРЕНИЕ УСТРОЙСТВ И СПОСОБОВ УПРОЧНЕНИЯ ГАЛТЕЛЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ППД, ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ

Александр Михайлович Михальченков¹, Юрий Игоревич Филин²,
Анна Анатольевна Тюрева³

^{1,2,3}Брянский государственный аграрный университет, г. Брянск, Российская Федерация
¹mihalchenkov.alexandr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3104-2548>
²rock2032@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0000-3012-8070>
³tyreva@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Александр Михайлович Михальченков,
mihalchenkov.alexandr@yandex.ru

Corresponding author: Alexander Mikhhalchenkov, mihalchenkov.alexandr@yandex.ru

Реферат. Ресурс тяжело нагруженных валов во многом определяется степенью напряженного состояния участка перехода от одного диаметра к другому. Существует достаточно большое количество методов снижения концентрации напряжений данных областей, однако особое место в данном случае занимает упрочнение поверхностей непрофильных тяжело нагруженных валов. Прежде всего, упрочнению подвергаются их галтели, что приводит к образованию сжимающих равномерно распределенных напряжений в технологической зоне и, соответственно, увеличению усталостной прочности таких деталей. Особое распространение метод получил при упрочнении коленчатых валов. Наряду с этим, поверхностное упрочнение применительно к вышеупомянутой детали используется для устранения ее изгибов. Особенно важен такой технологический процесс в случае восстановления деталей вращения. Между тем, существующие работы в данной области не решают имеющихся вопросов. В связи с этим, необходимо дать критический анализ способам и конструкциям для ППД галтелей с выработкой соответствующих предложений, что определяет актуальность работы. Целью исследования является рассмотрение устройств и способов упрочнения галтелей тел вращения ППД, их классификация и разработка рекомендаций по совершенствованию. Для раскрытия цели авторами проведено всестороннее рассмотрение имеющейся в открытом доступе информации в отношении упрочнения галтелей их наклепом. Это позволило выявить их достоинства и недостатки. Прежде всего, это отсутствие единой системы классификации, а также методов предотвращения образования «волны деформирования». На основании анализа предложена классификация, основанная на факторах, определяющих свойства валов и качество их поверхностных слоев и функциональном назначении обработки. Предложена собственная схема обработки ППД поверхностей, обеспечивающая предотвращение «волны деформирования» за один проход рабочего инструмента, которая базируется на известных положениях теории о внедрении шарового индентора в твердое тело.

Ключевые слова: пластическое деформирование; упрочнение галтелей; упрочняющие устройства; методы упрочнения; классификация; «волна деформирования».

CONSIDERATION OF DEVICES AND METHODS FOR STRENGTHENING THE GALTELS OF BODIES OF ROTATION OF PPD, THEIR CLASSIFICATION AND DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS FOR IMPROVEMENT

Alexander Mikhhalchenkov¹, Yuri Filin², Anna Tyureva²
^{1,2,3}Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russia

¹mihalchenkov.alexandr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3104-2548>

²rock2032@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0000-3012-8070>

³tyreva@yandex.ru

Abstract. *The service life of heavily loaded shafts is largely determined by the degree of stress in the transition area from one diameter to another. There are a fairly large number of methods for reducing the stress concentration of these areas, but a special place in this case is occupied by strengthening the surfaces of non-profile, heavily loaded shafts. First of all, their fillets are subjected to hardening, which leads to the formation of uniformly distributed compressive stresses in the technological zone and, accordingly, an increase in the fatigue strength of such parts. The method has become especially widespread when hardening crankshafts. Along with this, surface hardening is applied to the above-mentioned part to eliminate its bending. This technological process is especially important in the case of restoration of rotating parts. Meanwhile, existing work in this area does not solve existing issues. In this regard, it is necessary to give a critical analysis of the methods and designs for PPD fillets with the development of appropriate proposals, which determines the relevance of the work. The purpose of the study is to consider devices and methods for strengthening fillets of bodies of rotation of PPD, their classification and development of recommendations for improvement. To reveal the goal, the authors conducted a comprehensive review of the information available in the public domain regarding the strengthening of fillets by cold hardening. This made it possible to identify their advantages and disadvantages. First of all, this is the lack of a unified classification system, as well as methods for preventing the formation of a "wave of deformation". Based on the analysis, a classification is proposed based on the factors that determine the properties of the shafts and the quality of their surface layers and the functional purpose of the processing. A proprietary scheme for processing SPD surfaces is proposed, which ensures the prevention of a "wave of deformation" in one pass of the working tool, which is based on the well-known principles of the theory of the introduction of a ball indenter into a solid.*

Keywords: *plastic deformation; strengthening of fillets; strengthening devices; hardening methods; classification; "wave of deformation".*

Для цитирования: Михальченков А.М., Филин Ю.И., Тюрева А.А. Рассмотрение устройств и способов упрочнения галтелей тел вращения ППД, их классификация и разработка рекомендаций по совершенствованию // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 130-140. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-130-140>.

For citation: Mihalchenkov A., Filin Yu., Tyureva A. Consideration of devices and methods for strengthening fillets of bodies of rotation of PPD, their classification and development of recommendations for improvement. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 68(2): 130-140. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-130-140>.

Введение. Прочностные показатели тяжело нагруженных и сложнопрофильных тел вращения во многом определяются напряженным состоянием в области перехода от одного диаметра к другому [1]. Существенное снижение концентрации напряжений и увеличение прочности (σ_b) на этих участках достигается за счет формирования скруглений (галтелей) [2]. Однако их наличие не всегда обеспечивает необходимую σ_b , особенно в случаях, когда деталь эксплуатируется в условиях знакопеременных нагрузок [3] либо была подвержена технологическим операциям, связанным с ее восстановлением [4]. Одним из распространенных методов упрочнения галтелей является их поверхностное пластическое деформирование (ППД) [5]. Улучшение служебных свойств в этом случае происходит, в основном, путем образования сжимающих остаточных напряжений (σ_0) и их равномерного распределения [6]. Упрочнение поверхностным наклепом также применяется и для устранения изгибов валов, являющихся следствием эксплуатации или нарушения технологии изготовления (восстановления).

В то же время, многочисленные способы и устройства для проведения ППД галтелей до конца не решают всего комплекса задач, возникающих в реальных условиях исполнения технологического процесса упрочнения, а также последующего использования деталей. Прежде

всего практики сталкиваются с проблемой образования «волны деформирования» в виде выступающей области в зоне проведения ППД. Ликвидация этого образования требует проведения дополнительных технологических мероприятий, нередко нивелирующих эффект от упрочнения.

Кроме того, отсутствует сколь-нибудь, строгая классификация существующих методов и устройств ППД галтелей в соответствии с параметрами, определяющими служебные свойства изделия, и функциональное назначение.

Цель работы состоит в рассмотрении устройств и способов упрочнения галтелей тел вращения ППД, разработке классификации и рекомендаций по их совершенствованию.

Методология проведения исследования. Методической основой исследования является аналитический метод, который применяется для выявления существенных положительных и отрицательных сторон способов и конструкций для упрочнения галтелей валов ППД. Информационные базы, включающие научные труды, посвященные исследованиям процессов пластического деформирования поверхностей металлических тел, а также информацию об изобретениях в данной области науки. При обработке информационных материалов использовались методы системного анализа, монографический, абстрактно-логический и другие общенаучные способы.

Результаты и обсуждение. Для повышения усталостной прочности валов, эксплуатирующихся в условиях циклических нагрузок, авторами [7] предложен инструмент, позволяющий проводить поверхностное упрочнение галтелей ППД с обеспечением равномерной глубины распространения деформации по всему профилю обрабатываемой зоны. Он выполнен в виде клинового ролика с рабочим участком, образованным пересечением двух торов под углом друг к другу, а рабочий участок изготовлен с переменным радиусом профиля (рисунок 1). Использование такой компоновки обеспечивает создание областей сжимающих напряжений и приводит к росту прочностных показателей поверхностной зоны в районе пластического деформирования. Это приводит к падению σ_b на структурном уровне и уменьшению вероятности образования и развития микротрещин, а также уменьшает влияние концентратора напряжений. К сожалению, заключение автора не имеет экспериментального подтверждения, а вопросы, относящиеся к образованию «волны деформирования» и методы ее устранения вообще не рассматриваются.

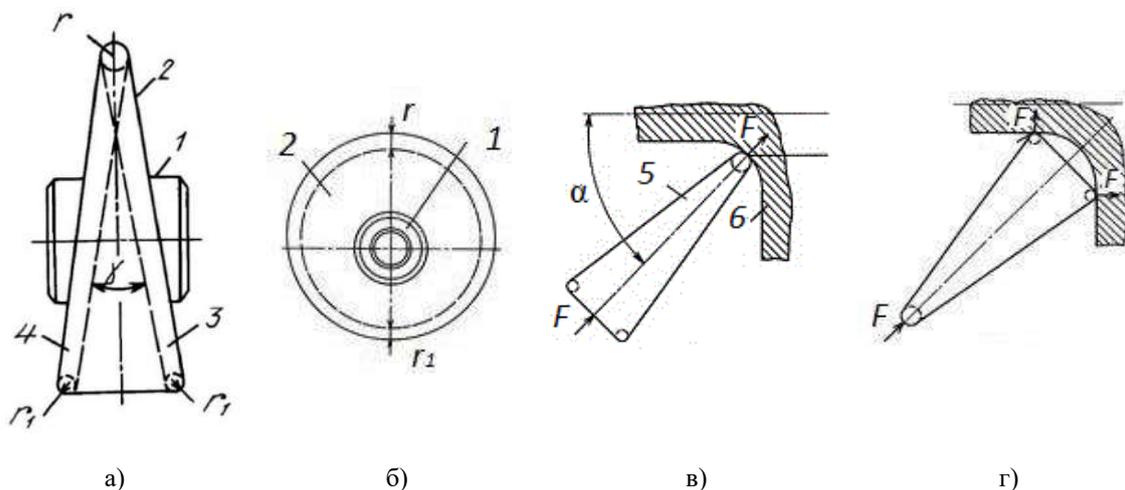


Рисунок 1 - Устройство для ППД галтелей деталей вращения: а – главный вид; б – вид сбоку; в-г – схемы взаимодействия инструмента с галтелью (1 - оправка, 2 - клиновой ролик с рабочим участком, 3 и 4 – торы; 5 – вершина клина; 6 – галтель; " γ " – угол пересечения торов; F – постоянное усилие; α - угол наклона ролика; r - максимальный радиус профиля ролика; r_1 - минимальный радиус профиля ролика)

В работе [8] предложен способ чистовой и одновременно упрочняющей обработки поверхностей валов обкаткой клиновым роликом (рисунок 2) всей рабочей поверхности детали за один проход. Достоинством способа следует считать наличие деформированного поверхностного слоя значительной глубины и волнистости по всему профилю. Неизменность угла вдавливания ролика в обрабатываемую поверхность позволяет обеспечить равномерное деформирование поверхности и, соответственно, увеличить ресурс детали. Для рассматриваемого случая волнистость рабочей поверхности детали является положительным фактором, в отношении же распределения деформации по глубине, сведения не конкретизируются.

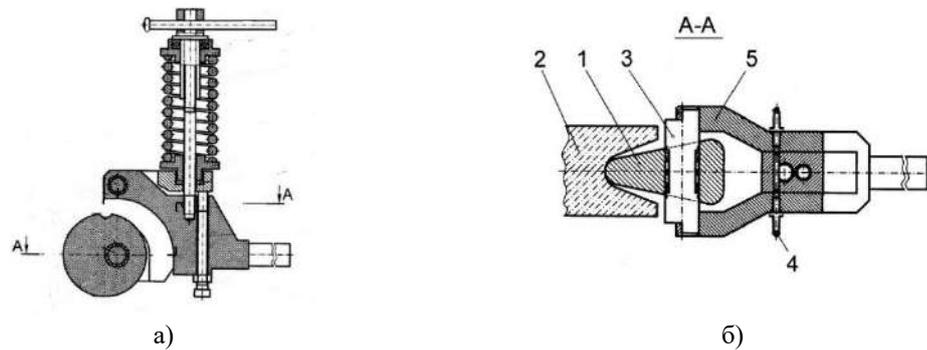


Рисунок 2 - Конструкция для чистовой и упрочняющей обработки поверхностей валов сложного профиля: 1 – клиновой ролик; 2 – деталь; 3 – ось; 4 – рым-болты; 5 – рычаг (а – общий вид; б – роликовый узел)

По мнению [9] обработка галтели, включающая резание и последующее холодное пластическое деформирование инструментом с профильным радиусом (рисунок 3), позволяет повысить предел выносливости детали за счет повышения уровня пластической деформации. При этом галтель становится практически равнопрочной с гладкой частью вала. Следует полагать, что наличие процесса точения в определенной мере позволит нивелировать выступы от последующего деформирования. В тоже время, обработка детали достаточно сложна в исполнении.



Рисунок 3 – Способ формирования упрочненной галтели (а – резание; б – пластическое деформирование)

Получение постоянной величины наклепа при накатывании валов с переходными галтелями, достигается применением устройства, предложенного в работе [10] (рисунок 4). Конструкция содержит корпус, в котором установлены державка с инструментом в виде ролика, расположенным под углом к оси его вращения, и силовой механизм в виде подпружиненного упора с дополнительной пружиной. Она снабжена двумя симметрично расположенными относительно оси державки клиновыми передаточными механизмами, одна часть которых установлена с возможностью взаимодействия с рабочим инструментом, а другая - с дополнительной силовой пружиной. Усилие накатывания будет автоматически создаваться двумя пружинами, что обеспечивает постоянный уровень упрочнения на всей обрабатываемой

радиусной поверхности вращения, в том числе, и на сопряженных с ней галтелях. Применение такого способа, безусловно, снизит степень волнистости продеформированной поверхности, но до конца исключить ее вряд ли возможно. Однородность деформаций по всей поверхности также вызывает сомнения.

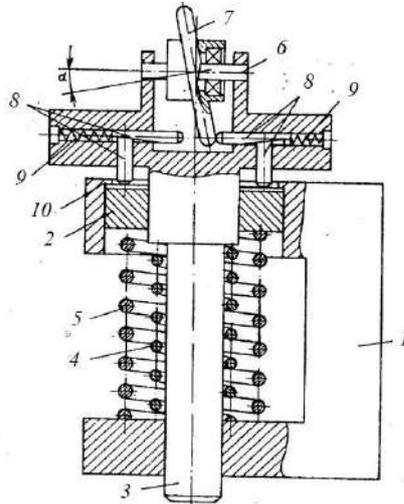


Рисунок 4 – Конструкция для ППД галтелей (1- корпус; 2 – втулка; 3 – державки; 4,5 – пружины; 6 - ось; 7 – ролик; 8 – два клиновых передаточных механизма; 9 – пружины для передаточных механизмов; 10 – выступ)

Способ упрочнения галтелей деталей ППД обкаткой роликом, перемещаемым в направлении от галтели к пригалтельной зоне, обеспечивает увеличение предела усталостной прочности деталей, так как обкатку осуществляют в обе стороны от галтели, обеспечивая перекрытие технологических зон, причем сначала обкатывают галтель и менее нагруженную пригалтельную зону (рисунок 5) [11]. Такой подход позволит избежать образования волнистости рабочей поверхности. Перекрытие зон деформирования, безусловно, обеспечит высокое качество поверхности, однако сложность реализации способа не позволяет рекомендовать его к широкому внедрению.

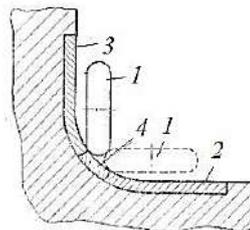


Рисунок 5 - Схема установки ролика при обработке галтелей (1 – ролик; 2 – менее нагруженная пригалтельная зона; 3 – более нагруженная пригалтельная зона; 4 – перекрытие зон обкатки)

Равномерность упрочнения пластической деформацией поверхности галтелей коленчатого вала и исключение искривления его оси, в соответствии с исследованиями [12], может быть достигнута одновременной обкаткой тремя, расположенными вокруг шейки, парами профильных роликов. Размеры профильных частей выполнены, охватывающими поле допусков геометрических параметров профиля галтели. При этом рабочее усилие сообщают одной паре роликов в радиальном направлении к центру обрабатываемого вала (рисунок 6). Авторы не объясняют, каким образом устраняется «наплыв» металла после завершения процесса обработки.

Кроме того, реализация технологии сопровождается существенными силовыми нагрузками как на исполнительные органы, так и на сопрягаемы детали конструкции.

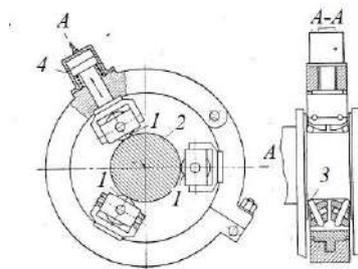


Рисунок 6 – Схема упрочнения галтелей (1 – ролики; 2 – шейка коленчатого вала; 3 – галтели вращающегося коленчатого вала; 4 – гидроцилиндр)

Конструкция для ППД галтелей коленчатых валов 4 (рисунок 7 а) [13] имеет обойму 1 с поддерживающими опорными роликами 2 и сепаратор, с установленными под некоторым углом к его горизонтальной оси деформирующими роликами 3. Для уменьшения коробления деталей и компенсации неточностей размеров, опорный ролик выполнен с двумя коническими поверхностями по концам, обращенными основаниями конусов друг к другу и контактирующими с деформирующими роликами, опорная поверхность которых изготовлена конической, а рабочая торовой. В данном случае конструкция предназначена для снижения вероятности нарушения размерной стабильности коленчатых валов путем наведения полей остаточных напряжений соответствующего знака. Схемой процесса не предусмотрена операция по устранению геометрических следов деформации.



Рисунок 7 – Способы, влияющие на размерную стабильность детали: а – снижение степени коробления; б – устройство прогиба

Наличие прогиба коленчатого вала можно устранить ППД галтелей с приложением максимального усилия со стороны вогнутости [14]. Так как вал вращают, то обкатку следует осуществлять начиная с шейки, где фиксируется максимальный прогиб, заканчивая шейкой, имеющей минимальный (рисунок 7 б). Перед операцией упрочнения партию коленчатых валов подвергают поверхностной закалке токами высокой частоты. После проведения ППД усталостная прочность увеличивается на 10-20%. Предлагаемые технологические операции вряд ли приведут к заметным результатам по устранению прогибов коленчатых валов из-за его сложной геометрической формы и наличия термоупрочняющей обработки. Кроме этого, способ не предусматривает удаления «волны деформирования».

Избежать образования «волны деформирования» можно применив однороликовое устройство, позволяющее изменять рабочее усилие при одновременном плавном перемещении исполнительного инструмента по профилю галтели с сохранением его нормального положения в любой момент времени обкатывания (рисунок 8) [15]. Тем не менее, авторы не исключают последующего шлифования.

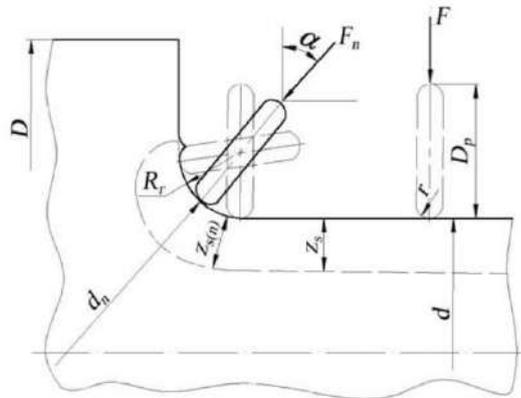


Рисунок 8 - Обкатка с подачей ролика по профилю галтели (D, d – диаметры участка валов; r – радиус профиля ролика; F – рабочая нагрузка; α – угол наклона ролика; F_n – усилие обкатки; $z_{s(n)}$ – глубина упрочненного слоя; R_r – радиус галтели; d_n – расчетный диаметр вала; Z_s – заданная глубина деформированного слоя; D_p – диаметр ролика)

На основании проведенного анализа методов и конструкций обработки галтелей ППД предлагается их классификация по двум признакам: 1 – параметры, определяющие свойства валов и качество их поверхностных слоев; 2 – функциональное назначение обработки (рисунок 9). (Вопросам классификации ППД посвящены работы Иркутского научно-технического университета [16, 17, 18]).



Рисунок 9 – Классификация способов ППД галтелей тел вращения

Как уже отмечалось, в процессе обработки образуется «волна деформирования», отрицательно сказывающаяся на качестве поверхности. Методы ее устранения или предотвращения, предлагаемые в анализируемых способах, либо сложны в реализации, либо в значительной степени снижают эффективность упрочнения. Поэтому авторы предлагают собственную схему обработки ППД, обеспечивающую ее предотвращение за один проход рабочего инструмента, которая базируется на известных положениях теории о внедрении шарового индентора в твердое тело [19]. (Излагаемое ниже носит дискуссионный характер).

При внедрении сферического тела в гомогенный материал (рисунок 10 а), согласно «классическим представлениям» [20], образуются поверхностные наплывы (рисунок 10 б) за счет выдавливания материала испытуемого образца. При этом $V=V_1+V_2$, где V - объем лунки, V_1 и V_2 объемы выдавленного материала (рисунок 10 б). Аналогичный процесс будет иметь место и в случае обкатывания галтели шариком, образуя «волны деформации». Для удаления наплывов следует их подвергнуть пластическому деформированию шариками, радиус которых соответствует радиусу кривизны области перехода наплыва к горизонтальной поверхности (r) (рисунок 10 в). Образовавшийся наплыв с незначительными геометрическими размерами удаляется прокаткой роликом (рисунок 10 г). Следует полагать, что применение такой схемы деформирования обеспечит отсутствие «волны деформирования» и высокую степень равномерности распределения сжимающих напряжений. Нагрузки на рабочие инструменты (P_1 P_2 P_3) будут определяться диаметрами шариков и ролика, свойствами деформируемого материала и задаваемым уровнем сжимающих напряжений.

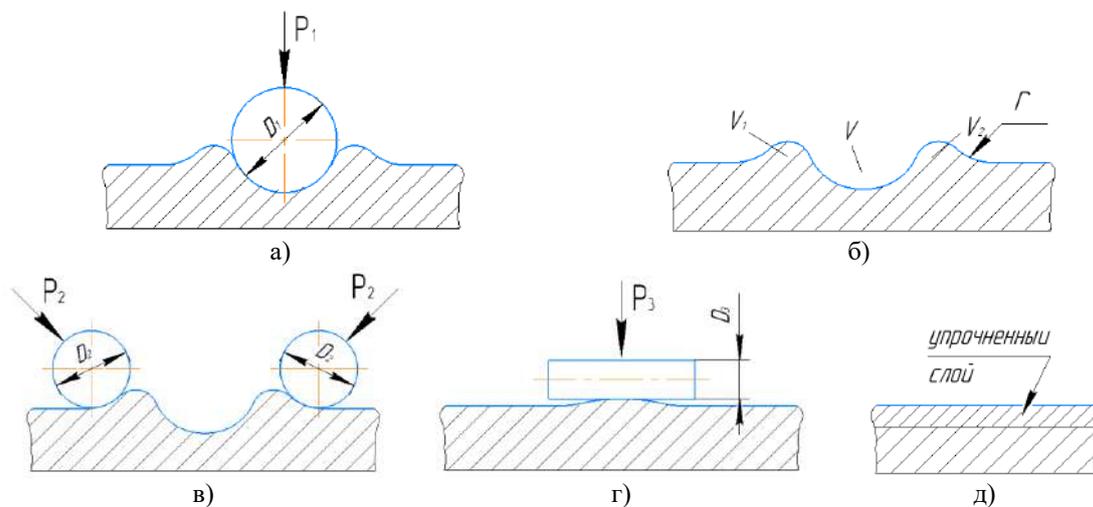


Рисунок 10 – Предлагаемая схема устранения «волны деформирования»

Выводы:

1. На основании проведенного аналитического обзора существующих методов и конструкций упрочнения галтелей поверхностным пластическим деформированием, разработана классификация, в основу которой положено следующее: параметры, определяющие свойства валов и качество их поверхностных слоев; функциональное назначение обработки.

2. Предложена схема ППД, обеспечивающая отсутствие «волны деформирования».

Список источников

1. Денисов В.А., Слинко Д.Б. Особенности технологии правки и упрочнения коленчатых валов чеканкой галтелей // Труды ГОСНИТИ. - 2016. - Т. 125. - С.182-190.

2. Чайнов Н.Д., Сусликов В.В. Упрочнение коленчатого вала методами поверхностного пластического деформирования // Грузовик. – 2014. – № 3. – С.31-35.

3. Емельянов В.Н., Костин П.В. Компьютерное моделирование процесса коробления пространственных коленчатых валов с пятью шатунными шейками // Вестник Новгородского государственного университета. - 2013. - № 75-1. - С.67-74.
4. Зезюля В.В. Повышение усталостной прочности валов с галтельными переходами после электроконтактной наварки проволокой // Ремонт. Восстановление. Модернизация. - 2014. - № 5. - С.33-38.
5. Костичев В.Э., Денискина Е.А., Попков А.А., Василенко А.А. Влияние протяжённости зоны упрочнения галтельных переходов на многоцикловую усталость коленчатого вала // В сборнике: Математическое моделирование и краевые задачи. Труды десятой Всероссийской научной конференции с международным участием: в 3-х томах. - 2016. - С.125-128.
6. Завистовский С.Э., Завистовский В.Э., Кириенко А.С. Залечивание микротрещин в процессе пневмодинамической обработки галтелей шеек коленчатых валов // В сборнике: Инновационные технологии в машиностроении. Электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета. Полоцкий государственный университет; Под редакцией В.К. Шелега, Н.Н. Попок. - 2018. - С.70-74.
7. Инструмент для поверхностного упрочнения галтелей валов: пат. 2069142 Рос. Федерация: С1 / Паршев С.Н., Дудкина Н.Г., Свитачев А.Ю.; заявл. 17.01.1995; опубл. 20.11.1996.
8. Устройство для чистовой и упрочняющей обработки поверхностей тел вращения сложного профиля: пат. 2493954 Рос. Федерация: С2 / Бутаков Б. И., Шебанин В. С., Бутакова Г. С., Марченко Д. Д.; заявл. 22.11.2010; опубл. 27.09.2013.
9. Способ обработки галтели ступенчатого вала: пат. 2368487 Рос. Федерация: С1 / Гончаров И. Т.; заявл. 15.04.2008; опубл. 27.09.2009.
10. Устройство для накатывания галтелей: Авторское свидетельство №952549, СССР / Улашкин А.П., Фомичев В.В., Даниякин Н.Ф.; заявл. 07.01.1981; опубл. 23.08.1982.
11. Способ упрочнения галтелей: Авторское свидетельство №366063 Рос. Федерация: А1 / Грудская Р.Е., Куликов О.О., Пузылевич С.А.; заявл. 06.04.1971; опубл. 16.01.1973.
12. Способ упрочнения галтелей коренных и шатунных шеек коленчатых валов: Авторское свидетельство №165087, СССР / Маляров Ф. М., Исаев А. И., Силаков Н. И., Лашко Л. А., Пахучий Я. И. и др.; заявл. 02.11.1962; опубл. 04.09.1964.
13. Устройство для упрочнения галтелей коленчатых валов: Авторское свидетельство №210690 СССР / Берштейн Г. Ш., Азаревич Г. М.; заявл. 25.08.1966; опубл. 06.02.1968.
14. Способ упрочнения галтелей валов: авторское свидетельство №1632746 СССР: А1 / Иминов М.У., Егоров В.П., Бабаян А.В.; заявл. 11.01.1988; опубл. 07.03.1991.
15. Сидякин Ю.И., Бочаров Д.А. Повышение циклической прочности галтелей ступенчатых валов обкаткой роликами или шариками // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2009. № 8 (56). С. 37-40.
16. Зайдес С.А. От пластического отпечатка при внедрении рабочего инструмента к созданию новых процессов отделочно-упрочняющей обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2019. - Т. 15. - № 9 (177). - С.399-403.
17. Зайдес С.А., Фам В.А. Повышение качества калиброванной стали поверхностным деформированием. часть 1. Определение напряженного состояния цилиндрических деталей при орбитальном поверхностном деформировании // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2020. - Т. 63. - № 10. - С.802-807.
18. Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя при реверсивном поверхностном пластическом деформировании деталей машин // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2022. - Т. 18. - № 7 (211). - С. 320-327.
19. Отений Я.Н., Лаврентьев А.М. Сравнение различных методов определения глубины упрочнения при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием // Известия Волгоградского государственного технического университета. - 2017. - № 9 (204). - С. 50-54.
20. Удалов А.В. Исследование влияния испытательной нагрузки на размерный эффект при измерении твердости материалов сферическим индентором // Черные металлы. - 2020. - № 9. - С. 62-67.

References

1. Denisov V.A., Slinko D.B. Features of technology for straightening and hardening crankshafts by embossing fillets // Proceedings of GOSNITI. - 2016. - Т. 125. - P. 182-190.
2. Chainov N.D., Suslikov V.V. Strengthening the crankshaft using surface plastic deformation methods // Truck. – 2014. – No. 3. – P.31-35.
3. Emelyanov V.N., Kostin P.V. Computer modeling of the process of warping of spatial crankshafts with five connecting rod journals // Bulletin of the Novgorod State University. - 2013. - No. 75-1. - P.67-74.
4. Zezyulya V.V. Increasing the fatigue strength of shafts with fillet transitions after electrocontact welding with wire // Repair. Recovery. Modernization. - 2014. - No. 5. - P.33-38.
5. Kostichev V.E., Deniskina E.A., Popkov A.A., Vasilenko A.A. Influence of the length of the hardening zone of fillet transitions on high-cycle fatigue of the crankshaft // In the collection: Mathematical modeling and boundary value problems. Proceedings of the tenth All-Russian scientific conference with international participation: in 3 volumes. - 2016. - P.125-128.
6. Zavistovsky S.E., Zavistovsky V.E., Kirienko A.S. Healing of microcracks in the process of pneumodynamic treatment of fillets of crankshaft journals // In the collection: Innovative technologies in mechanical engineering. Electronic collection of materials from the international scientific and technical conference dedicated to the 50th anniversary of Polotsk State University. Polotsk State University; Edited by V.K. Shelega, N.N. Butt. - 2018. - P.70-74.
7. Tool for surface hardening of shaft fillets: Pat. 2069142 Ross. Federation: C1 / Parshev S.N., Dudkina N.G., Svitachev A.Yu.; application 01/17/1995; publ. 11/20/1996.
8. Device for finishing and hardening the surfaces of rotating bodies of complex profile: Pat. 2493954 Ross. Federation: C2 / Butakov B. I., Shebanin V. S., Butakova G. S., Marchenko D. D.; application 11/22/2010; publ. 09/27/2013.
9. Method for processing the fillet of a stepped shaft: Pat. 2368487 Ross. Federation: C1 / Goncharov I. T.; application 04/15/2008; publ. 09/27/2009.
10. Device for rolling fillets: Author's certificate No. 952549, USSR / Ulashkin A.P., Fomichev V.V., Danyakin N.F.; application 01/07/1981; publ. 08/23/1982.
11. Method of strengthening fillets: Author's certificate No. 366063 Ros. Federation: A1 / Grudskaya R.E., Kulikov O.O., Puzylevich S.A.; application 04/06/1971; publ. 01/16/1973.
12. Method of strengthening fillets of main and connecting rod journals: Author's certificate No. 165087, USSR / Malyarov F. M., Isaev A. I., Silakov N. I., Lashko L. A., Pakhuchiy Ya. I. et al. ; application 02.11.1962; publ. 09/04/1964.
13. Device for strengthening crankshaft fillets: Author's certificate No. 210690 USSR / Bershtein G. Sh., Azarevich G., M.; application 08/25/1966; publ. 02/06/1968.
14. Method of strengthening shaft fillets: author's certificate No. 1632746 USSR: A1 / Iminov M.U., Egorov V.P., Babayan A.V.; application 01/11/1988; publ. 03/07/1991.
15. Sidyakin Yu.I., Bocharov D.A. Increasing the cyclic strength of fillets of stepped shafts by rolling in rollers or balls // News of the Volgograd State Technical University. 2009. No. 8 (56). pp. 37-40.
16. Zaides S.A. From plastic imprint when introducing a working tool to the creation of new processes of finishing and strengthening processing // Hardening technologies and coatings. - 2019. - Т. 15. - No. 9 (177). - P.399-403.
17. Zaides S.A., Pham V.A. Improving the quality of calibrated steel by surface deformation. Part 1. Determination of the stress state of cylindrical parts during orbital surface deformation // News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy. - 2020. - Т. 63. - No. 10. - P.802-807.
18. Zaides S.A., Nguyen H.H. Stress-strain state of the surface layer during reverse surface plastic deformation of machine parts // Strengthening technologies and coatings. - 2022. - Т. 18. - No. 7 (211). - pp. 320-327.
19. Oteniy Ya.N., Lavrentyev A.M. Comparison of various methods for determining the depth of hardening when processing parts by surface plastic deformation // News of the Volgograd State Technical University. - 2017. - No. 9 (204). - P. 50-54.
20. Udalov A.V. Study of the influence of test load on the size effect when measuring the hardness of materials with a spherical indenter // Ferrous metals. - 2020. - No. 9. - P. 62-67.

Информация об авторах

А.М. Михальченков – доктор технических наук, профессор; Ю.И. Филин - кандидат технических наук; А.А. Тюрева – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

A. Mikhailchenkov - Candidate of Technical Sciences, Professor; Yu. Filin - Candidate of Technical Sciences; A. Tyurneva - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 11.03.2024 Принята к публикации (Accepted): 18.04.2024

Тип статьи: научная

УДК 547.326

DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-141-149

ВЛИЯНИЕ ОЗОНА НА КОРРОЗИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

*Иван Васильевич Баскаков*¹, *Владимир Иванович Оробинский*²,
*Аркадий Васильевич Химченко*³, *Алексей Викторович Чернышов*⁴,
*Ольга Васильевна Чернова*⁵

^{1, 2, 3, 4} Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
г. Воронеж, Российская Федерация

⁵ МБОУ Панинская СОШ, Российская Федерация, п.г.т. Панино Панинского района
Воронежской области

¹ vasich2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6041-5943>,

² main@agroeng.vsau.ru,

³ himch.arkady@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9340-4252>,

⁴ lexa-c@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9302-9934>,

⁵ chernovaol2012@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Баскаков Иван Васильевич, vasich2@yandex.ru
Corresponding author: Baskakov Ivan, vasich2@yandex.ru

Реферат. Исследования по влиянию озонной обработки на коррозию металлов приведены в статье. Результаты экспериментов по изменению состояния металлов и сталей при их нахождении в агрессивных средах в присутствии озона проанализированы. В большинстве случаев озон-воздушная смесь оказывает отрицательное воздействие на различные металлы и сварные соединения, увеличивая скорость коррозии. Учитывая, что в последнее время популярность озонных технологий во всех отраслях неуклонно растёт, то массовое применение озона в сельском хозяйстве это дело времени. Поэтому возникает необходимость проведения исследований, направленных на изучение коррозионной устойчивости различных сталей и сплавов, используемых в агропромышленном комплексе. Аналитическим путём установлено, что одним из наиболее доступных легирующих элементов, устойчивых к озонной обработке, является хром. Однако его содержание в сталях марок Сталь 08кп, Сталь 45, 45Х, Сталь 60С2, наиболее массово применяемые в сельхозмашиностроении, колеблется от 0,1 до 1,1%. Такое содержание хрома может быть недостаточным и поэтому необходимо провести подобные исследования. Установлено, что наиболее распространённая Сталь 08кп показала достаточную устойчивость к агрессивной среде в присутствии озона в результате эксперимента, вполне сопоставимую с более дорогими сплавами. При этом введение озона в раствор 70% уксусной кислоты снизило потерю массы на единицу площади сталей марок Сталь 08кп, Сталь 45, 45Х, Сталь 60С2 в 2...7 раз. Это говорит о том, что озон блокирует атомы металлов и предотвращает воздействие агрессивной среды.

Ключевые слова: коррозионная стойкость металлов, коррозия металлов, уксусная кислота, озон, озонородная смесь.

THE EFFECT OF OZONE ON THE CORROSIVE BEHAVIOR OF METALS AND ALLOYS

*Ivan Baskakov*¹, *Vladimir Orobinsky*²; *Arkady Himchenko*³, *Aleksey Chernyshov*⁴,
*Olga Chernova*⁵

^{1, 2, 3, 4} Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

⁵ Municipal budgetary educational institution Paninskaya secondary school, Russia, Panino,
Paninsky district, Voronezh region

¹ vasich2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6041-5943>,

² main@agroeng.vsau.ru,

³ himch.arkady@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9340-4252>,

⁴ lexa-c@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9302-9934>.

⁵ chernovaol2012@yandex.ru

Abstract. *Research on the effect of ozone treatment on metal corrosion is presented in the article. The results of experiments on changes in the state of metals and steels when they are in aggressive environments in the presence of ozone are analyzed. In most cases, the ozone-air mixture has a negative effect on various metals and welded joints, increasing the rate of corrosion. Considering that recently the popularity of ozone technologies in all industries has been steadily growing, the massive use of ozone in agriculture is a matter of time. Therefore, there is a need to conduct research aimed at studying the corrosion resistance of various steels and alloys used in the agricultural sector. It has been analytically established that one of the most accessible alloying elements resistant to ozone treatment is chromium. However, its content in steel grades Steel 08kp, Steel 45, 45X, Steel 60S2, which are most widely used in agricultural engineering, ranges from 0.1 to 1.1%. This chromium content may be insufficient and therefore similar studies need to be carried out. It was established that the most common Steel 08kp showed sufficient resistance to aggressive environments in the presence of ozone as a result of the experiment, quite comparable with more expensive alloys. At the same time, the introduction of ozone into a solution of 70% acetic acid reduced the weight loss per unit area of steel grades Steel 08kp, Steel 45, 45X, Steel 60S2 by 2...7 times. This suggests that ozone blocks metal atoms and prevents exposure to aggressive environments.*

Keywords: *corrosion resistance of metals, metal corrosion, acetic acid, ozone, ozone-air mixture.*

Для цитирования: Баскаков И.В., Оробинский В.И., Химченков А.В., Чернышнов А.В., Чернова О.В. Влияние озона на коррозионное поведение металлов и сплавов // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 141-149. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-141-149>.

For citation: Baskakov I., Orobinsky V., Khimchenkov A., Chernyshnov A., Chernova O. The effect of ozone on the corrosive behavior of metals and alloys. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 68(2): 141-149. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-141-149>.

Введение. Озон образуется в стратосфере Земли под воздействием ультрафиолетовых лучей Солнца. Этот процесс называется фотохимическим окислением и происходит естественным образом без участия человека. Однако люди научились получать газ искусственным путем. Наиболее распространенным способом образования озона является пропуск электрического разряда в кислороде. Приборы, работающие на данном принципе, называются озонаторами. При этом электрический разряд создаёт условия, при которых молекулы кислорода, состоящие из двух атомов и присутствующие в атмосфере Земли, распадаются и затем на некоторое время объединяются в трёхатомные молекулы озона. Он является очень реакционноспособным газом, окисляя практически все вещества. Поэтому озон используется для дезинфекции и очистки различных сред от опасных веществ. При этом газ через некоторое время разложится до обычного кислорода, не оставив после себя вредных соединений.

Развитие науки и техники позволило значительно усовершенствовать конструкцию озонаторов, одновременно повысив их производительность и снизив цену оборудования. На данный момент применение озона даже в бытовых приборах, например, холодильниках, очистителях воды, кондиционерах и многих других повседневно используемых устройствах уже никого не удивляют. Тем более не оправдано слабое внедрение процесса озонирования в сельское хозяйство РФ, хотя научные исследования по применению озоновооздушной смеси при предпосевной обработке семян сельскохозяйственных культур [1, 2], сушке влажного зерна [3, 4], дезинсекции [5] и хранении [6] урожая ведутся и доказали свою эффективность. Поэтому широкое использование озонных технологий в агропромышленном комплексе дело времени. Так как озон является достаточно активным окислителем, он может приводить к повышенной коррозии металлических элементов конструкций в местах хранения и обработки сельскохозяйственной продукции, что приведёт к снижению срока эксплуатации конструкций в целом. В связи с этим

исследования, направленные на изменение состояния металлов и их сплавов в присутствии озона, являются актуальными.

Целью статьи является оценка возможного окислительного воздействия озоновоздушной смеси на металлические конструкции из различных сплавов, в том числе при наличии дополнительного агрессивной среды.

Анализ состояния вопроса. Озонные технологии человек начал промышленно применять в конце XIX века. При этом отмечался повышенный износ большинства узлов оборудования в присутствии озона. Однако было отмечено, что некоторые материалы неплохо переносят воздействие агрессивного газа. Поскольку озон образуется в довольно специфических условиях, то его воздействие в основном изучали в кислой среде и с редкими металлами, например, никель [7], хром [8], титан [9-10], кобальт [11], молибден [12]. При этом исследований, направленных на изучение влияния процесса озонирования на сплавы, применяемые в агропромышленном комплексе, практически отсутствуют [13]. Стоит отметить, что имеются разрозненные публикации по влиянию озоновоздушной смеси на железо [11], различные стали [14, 15] и их сварные соединения [16], а также другие конструкционные материалы [17, 18] или органические соединения [19] в других отраслях.

Анализ разрозненных исследований по влиянию процесса озонирования на различные материалы показал, что в большинстве случаев озон пагубно сказывается на их состоянии. Однако имеются определённые случаи, при которых газ делает пассивной агрессивную среду. Так установлено [8], что введение озона в раствор серной кислоты снижает коррозию хрома, причём практически на порядок с 0,0813 до 0,0076 г/(м²·ч) в 10% концентрации H₂SO₄ и с 0,0058 до 0,0007 г/(м²·ч) в 70% концентрации H₂SO₄ [17]. Это объясняется тем, что практически все атомы металла блокируются окислителем, поэтому электрохимическое растворение металла в кислоте ослабевает и становится пассивным. Следовательно, введение озона в раствор серной кислоты снижает скорость коррозии хрома. Примерно такой же эффект достигнут на некоторых нержавеющих сталях [7, 14]. В них озон, введённый в растворы серной кислоты (до 20%) и являющийся деполяризатором катодных процессов, переводит исследуемые образцы в пассивное состояние. Например, газ пассивировал сталь 08X17T в 5% растворе уксусной кислоты при температуре 20°C [17]. Также зафиксировано снижение скорости коррозии у стали 12X18H10T при введении озона в 20% серную кислоту с 4,3 г/(м²·ч) до 0,03 г/(м²·ч), причём в данном случае отмечено, что влияние газа положительно сказалось на снижении межкристаллитной коррозии [17]. Снижение коррозионной активности происходило при помещении титана марки BT1-1 в озонируемую 10% соляную кислоту [9]. При температуре 40°C и концентрации озона 0,00028 моль/л скорость коррозии у данного металла в заданных условиях снижалась с 0,56 до 0,028 г/(м²·ч), причём дальнейшее увеличение температуры до 60°C способствовало уже увеличению коррозии [17]. Это можно объяснить ускоренным разложением газа при нагреве кислоты и ускорению анодных процессов в большей степени, чем катодных при восстановлении озона [15].

Совсем другой результат получен при помещении никеля в озонируемую серную кислоту с концентрацией 2, 5, 10, 20, 40, 70% [7]. Во всех случаях озон с концентрацией в газовой среде 0,1 моль/м³ интенсифицировал скорость коррозии никеля в 2,5...22,3 раза. Причём максимум 1,56 г/(м²·ч) достигнут в 2% концентрации H₂SO₄, а минимум 0,1 г/(м²·ч) – в 20% концентрации H₂SO₄. При этом скорость коррозии получена по потере массы образцов за время эксперимента 100 часов. Снижение скорости коррозии никеля с увеличением концентрации серной кислоты до 20% в данных условиях объясняется достаточным количеством ионов водорода, что позволяет одновременно обеспечить их необходимое количество и при восстановлении озона, и при насыщении поверхности металла. Следовательно, введение озона в раствор серной кислоты способствовало нейтрализации ионов водорода при электронном слое, что в свою очередь увеличило скорость коррозии никеля [7]. Примерно такой же эффект получен при озонировании стали 10X17H13M2T в серной кислоте концентрацией 70%. При этом скорость коррозии при температуре 25°C составляла 0,8 г/(м²·ч), а при введении озона она увеличилась до 0,86 г/(м²·ч), что говорит о негативном влиянии газа в данных условиях [17]. Также плохо себя проявил коррозионно-стойкий сплав 06XH28MDT. Озонирование 70% серной кислоты при температуре

60°C способствовало увеличению скорости коррозии с 0,07 г/(м²·ч) до 0,49 г/(м²·ч) [17]. Негативно озон сказался на нахождении стали 09Г2С в 70% серной кислоте при температуре 20°C [17], хотя в целом данный металл достаточно устойчив к агрессивной кислой среде. Алюминий марки АД0 в 20% растворе азотной кислоты коррозировал сильнее в присутствии озона, что было объяснено формированием пористых плёнок при подачи агрессивного газа [17].

Стоит заметить, что газ особенно негативно влияет на сварные швы [16]. Поэтому желательно их дополнительно защищать и в первую очередь контролировать их состояние. Особенно плохо показали себя сварные швы нержавеющей стали типа «18-10», содержащие около 67% железа, 18% хрома и 10% никеля, а также сварные соединения ферритных нержавеющей сталей типа 08Х17Т, содержащих около 80% железа и 16% хрома. В присутствии озона у данных сплавов наблюдается склонность к межкристаллитной коррозии, что особенно опасно. Сварные швы стали 06ХН28НДТ, состоящей из 36...47% железа, 26...29% никеля, 22...25% хрома, 2,5...3,5% меди, 2,5...3,0% молибдена, 0,5...0,9% титана, показали наилучшую эффективность в агрессивных средах в присутствии озона и не уступали основному материалу. Однако цена данного сплава не позволяет его использовать в сельском хозяйстве и может применяться только в ядерной промышленности, например при изготовлении реакторов [16].

Обобщая представленные результаты, можно прийти к выводу, что влияние озона на коррозионно-электрохимические свойства различных металлов неоднозначно. Активизируя катодные процессы, газ способствует образованию пассивного слоя на поверхности сплавов, однако иногда это позволяет ослабить коррозионные процессы, а иногда их усилить. Причём озон способен защищать некоторые металлы не только от общей, но и от межкристаллитной коррозии [17].

Исследуемые стали, проявляющие достаточную устойчивость к озону слишком дорогостоящие, чтобы применяться в сельском хозяйстве. Наибольшее распространение при производстве сельскохозяйственных машин и оборудования получили стали марок:

- Сталь 08кп, содержащая около 98% железа и до 0,1% хрома;
- Сталь 45, содержащая около 97% железа и до 0,25% хрома;
- 45Х содержащая около 97% железа и 0,8...1,1% хрома;
- Сталь 60С2, содержащая около 96% железа, 1,5...2,0% кремния, 0,6...0,9% марганца и до 0,3% хрома.

Как показал анализ озоно-стойкости металлов, хром является наиболее доступным легирующим элементом, но его содержание в сталях, применяемых в сельском хозяйстве, слишком мало.

Задача экспериментальных исследований состояла в определении убыли массы металлов на единицу их площади, при их нахождении в 70% растворе уксусной кислоты. При этом данная агрессивная среда выбрана потому, что именно она может образовываться в процессе хранения сельхозпродукции при брожении сахаров в отсутствие кислорода, например в плохо проветриваемых помещениях или при сильно утрамбованной массе растительного происхождения.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели в работе использовались следующие методы: анализ – для получения априорной информации о влиянии озono-воздушной смеси на различные металлы и сплавы; экспериментальные исследования – для получения новых данных о коррозии металлов присутствии озона и агрессивной среде, наиболее характерной для сельского хозяйства.

Для озонирования использовали озонатор ООО "ОЗОН ПРОМ-ТЕХ" (г. Коломна).

Методика проведения эксперимента была следующая. Всего было заготовлено по три образца каждой из марок стали Сталь 08кп, Сталь 45, 45Х, Сталь 60С2. Первый вариант – являлся контрольным и хранился в комнатных условиях. Второй и третий образцы помещали в ёмкость с раствором уксусной кислоты CH₃COOH с концентрацией 70%. Всего было три контакта сплавов с агрессивной средой, каждый из которых составлял 4 часа с перерывами между ними 168 часов. Причём только третий вариант подвергался озонированию при нахождении в растворе уксусной кислоты. Средняя концентрация озона в озono-воздушной смеси подаваемой в раствор уксусной

кислоты составляла 4,88 мг/м³. За 12 часов озонирования доза озонной обработки достигла значения 3515 мг /м³.

Согласно ГОСТ 9.908-85 «Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости» образцы по окончании эксперимента обрабатывались механически. При этом удалялась часть металла, подверженная коррозии. До и после эксперимента образцы взвешивались на электронных весах с точностью 0,01 г. Это позволило определить потерю массы на единицу площади.

Потерю массы на единицу площади металлов рассчитывали по формуле

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{S}, \text{ г/см}^2,$$

где m_0 – масса образца до эксперимента, г; m_1 – масса образца после эксперимента и удаления продуктов коррозии, г; S – площадь поверхности образца, см².

Масса образцов до проведения эксперимента представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Масса образцов до проведения эксперимента

Марка стали	Масса, г		
	контрольных образцов при комнатных условиях	образцов до погружения в 70% раствор уксусной кислоты	образцов до озонирования в 70% растворе уксусной кислоты
Сталь 08КП	118,97	67,31	57,21
Сталь 45	39,56	20,20	23,48
45X	72,70	39,47	74,76
Сталь 60С2	132,09	91,01	90,46

Площадь определялась расчетным путем по фактическим размерам образца (табл. 2). Абсолютная погрешность оценивалась в $2,5 \cdot 10^{-3}$ мм².

Таблица 2 – Площади образцов

Марка стали	Площадь, см ²		
	контрольных образцов при комнатных условиях	образцов погруженных в 70% раствор уксусной кислоты	образцов озонируемых в 70% растворе уксусной кислоты
Сталь 08КП	21,36	10,21	12,52
Сталь 45	19,23	10,27	11,73
45X	10,24	6,67	10,24
Сталь 60С2	24,30	16,38	16,90

Площади образцов в ходе экспериментов существенных изменений не имели.

Результаты и их обсуждение. В работе использованы аналитический и сравнительный методы, а также материалы лабораторных экспериментов.

После проведения эксперимента масса образцов снизилась (табл. 3).

Таблица 3 – Масса образцов после проведения эксперимента

Марка стали	Масса, г		
	контрольных образцов при комнатных условиях	образцов погруженных в 70% раствор уксусной кислоты	образцов озонируемых в 70% растворе уксусной кислоты
Сталь 08кп	118,96	66,06	56,91
Сталь 45	39,56	19,11	23,31
45X	72,70	38,97	74,40
Сталь 60С2	132,08	87,13	88,46

У контрольных образцов Сталь 45 и 45X изменения массы были незначительные, поэтому их взвешивали дополнительно с точностью 0,001 г.

Результаты исследований по потерям массы на единицу площади представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Потеря массы на единицу площади

Марка стали	Контрольные образцы при комнатных условиях, г/см ²	Образцы, погруженные в 70% раствор уксусной кислоты, г/см ²	Образцы, озонируемые в 70% растворе уксусной кислоты, г/см ²
Сталь 08кп	0,00047	0,12243	0,02396
Сталь 45	0,00001	0,10613	0,01449
45X	0,00001	0,07496	0,03516
Сталь 60С2	0,00041	0,23687	0,11834

Графическое отображение результатов исследований по потерям массы на единицу площади представлены на рисунке.

Анализ таблицы 4 и рисунка 1 показывает, что при нахождении образцов данных сплавов даже в закрытом помещении при комнатной температуре в течение месяца способствовало протеканию в них коррозионных процессов. Агрессивная среда в виде уксусной кислоты многократно увеличивала коррозию всех исследуемых марок сталей. Наибольшую устойчивость к агрессивной среде показала сталь марки 45X, а наименьшую – Сталь 60С2, которая имеет наименьшее количество железа, что говорит о том, что её прочие составляющие плохо переносят агрессивную среду. Сталь 45 содержит больше углерода и других легирующих элементов, таких как хром и марганец, по сравнению с образцом марки Сталь 08кп, поэтому она меньше подвержена воздействию уксусной кислоты. Однако введение озono-воздушной смеси в 70% растворе уксусной кислоты снижает потерю массы на единицу площади исследуемых сталей в 2...7 раз. Следовательно, атомы металлов, входящих в состав данных сплавов, блокируются озоном, поэтому их электрохимическое растворение в агрессивной среде ослабевает.

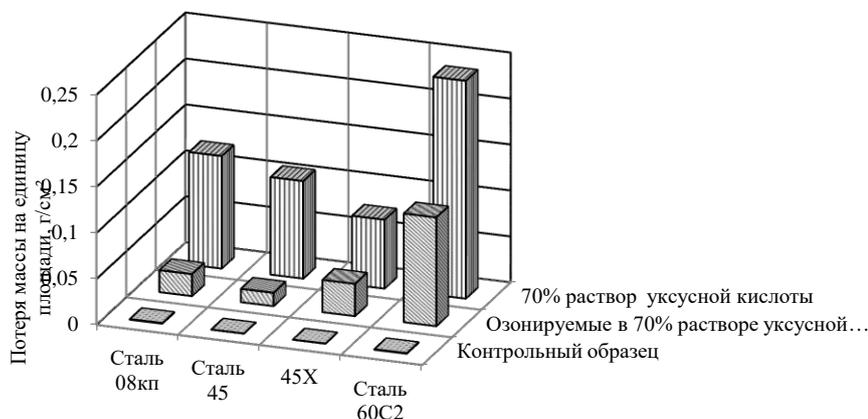


Рисунок 1 – Результаты исследований по потерям массы образцов сталей на единицу площади

Заключение. В большинстве случаев озono-воздушная смесь оказывает пагубное воздействие на металлы и их сварные соединения. Практически у всех сплавов, за исключением дорогостоящих, увеличивается скорость коррозии. В результате эксперимента установлено, что введение озона в уксусной кислоты снижает потерю массы на единицу площади сталей марок Сталь 08кп, Сталь 45, 45X, Сталь 60С2 в 2...7 раз. Это говорит о том, что озон блокирует атомы металлов и предотвращает воздействие агрессивной среды. Для получения данного эффекта необходимо осуществлять тщательный подбор металлов, работающих в присутствии озона, и проводить соответствующие научные исследования.

Список источников

1. Влияние предпосевного озонирования семян на урожайность сельскохозяйственных культур / И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.М. Гиевский, А.В. Чернышов, А.П. Тарасенко // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т.12, № 4 (63). С. 13-20. (DOI:10.17238/issn2071-2243.2019.4.13)
2. Modes of treating pre-sowing grain seeds with ozone / I.V. Baskakov, V.I. Orobinsky, A.M. Gievsky, A.V. Chernyshov, V.A. Gulevsky // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on World Technological Trends in Agribusiness (Russia, Omsk, 29-30 March, 2021). IOP Publishing Ltd, 2022. Vol. 954. №012009. 5 p. (DOI: 10.1088/1755-1315/954/1/012009)
3. Влияние процесса озонирования на эффективность сушки зерна кукурузы / И.В. Баскаков, В.И. Оробинский, А.М. Гиевский, А.В. Чернышов, Т.Н. Тертычная // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. Т.11, №4 (59). С. 127-133. (DOI: 10.17238/issn2071-2243.2018.4.127)
4. Studies of the ozonation process when drying grain / I.V. Baskakov, V.I. Orobinsky, V.A. Gulevsky, A.M. Gievsky, A.V. Chernyshov // IOP Conference Series. 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming (Russia, Voronezh, October 17-18, 2019). IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 422. №. 012009. 9 p. (DOI: 10.1088/1755-1315/422/1/012009)
5. Grain disinfection with ozone-air mixture / I.V. Baskakov, V.I. Orobinsky, A.M. Gievsky, V.A. Gulevsky, A.V. Chernyshov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Environmental Problems of Food Security: International Scientific and Practical Conference (Russia, Voronezh, 21-22 February, 2022). IOP Publishing Ltd, 2022. Vol. 1043. №012037. 5p. (DOI: 10.1088/1755-1315/1043/1/012037)
6. Influence of ozonation in seed storage on corn grain yield and its quality / I.V. Baskakov, V.I. Orobinsky, V.A. Gulevsky, A.M. Gievsky, A.V. Chernyshov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness (TSIA-2019) (Russia, Stavropol, October 21-22, 2019). IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 488. №. 012007. 6 p. (DOI: 10.1088/1755-1315/488/1/012007)
7. Татарченко Г.О., Черкас К.В., Кузюков А.Н. Коррозионно-электрохимическое поведение никеля в озонируемых растворах серной кислоты // Физико-химическая механика материалов. 2002. Т.38, Вып. 1. С. 98-100.
8. Татарченко Г.О., Черкас К.В., Павлова М.В. О пассивации хрома в озонируемых растворах серной кислоты // Физико-химическая механика материалов. 2001. Вып. 2. С. 97-102.
9. Макарова Ж.Г. Влияние процессов озонирования на коррозионно-электрохимическое поведение титана в кислых средах // Вісник Східноукраїнського державного університету. 1999. № 4(20). С. 96-98.
10. Самойлова Ж.Г. Влияние озона на коррозионно-электрохимическое поведение титана и его сплавов с алюминием в кислых средах: дис... канд. техн. наук: 05.17.14. Северодонецк, 2004. 146 с.
11. Черкас К.В., Татарченко Г.О. Влияние озона на катодное и анодное поведение железа и кобальта в сернокислых растворах. – Текст: электронный // PANDIA: Интернет-портал. – URL: <https://pandia.ru/text/80/565/424.php?ysclid=18sz0jqu8i548476200> (Дата обращения: 30.09.2023).
12. Черкас К.В. Поведение молибдена в озонируемых растворах серной кислоты // Физико-химическая механика материалов. 2002. Вып. №3. С.148-153.
13. Жуков И.А., Баскаков И.В., Оробинский В.И. Исследование влияния процесса озонирования на коррозию металлов // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 17 марта 2023 г.). Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. С. 28-37.
14. Влияние озона на коррозионное поведение сталей 12X18H10T, 08X22H10T, 06XH28MДТ в процессах синтеза азодикарбоновых кислот / Н.Ф. Тюпало, Г.О. Татарченко, Б.А. Гру, В.С. Кузуб // Журнал прикладной химии. 1991. №5. С.1085-1087.
15. Татарченко Г.О. Влияние озона на коррозионно-электрохимическое поведение сталей в процессах органического синтеза: дис... канд. техн. наук: 05.17.14. М., 1993. 157 с.
16. Татарченко Г.О. Коррозионное поведение сварных соединений в озонируемых кислых средах // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т.1. № 5. С. 45-48.

17. Татарченко Г.О., Кузюков А.Н. Влияние озона на электрохимическое и коррозионное поведение металлов в кислых средах // Защита металлов. 2004. Т.40, №1. С. 106-108.

18. Татарченко Г.О., Шаповалова И.Н., Тюпало Н.Ф. Подбор коррозионностойких конструкционных материалов в озонируемых растворах уксусной кислоты // Физико-химическая механика материалов. 2002. Вып. 3. С. 143-147.

19. Татарченко Г.О., Шаповалова И.Н. Влияние озона на коррозию сталей в процессах окисления пиридинол // Защита металлов. 2005. №5. С. 515-519.

References

1. The influence of pre-sowing ozonation of seeds on the yield of agricultural crops / I.V. Baskakov, V.I. Orobinsky, A.M. Gievsky, A.V. Chernyshov, A.P. Tarasenko // Vestnik of the Voronezh State Agrarian University. 2019. T.12, No. 4 (63). pp. 13-20. (DOI:10.17238/issn2071-2243.2019.4.13)

2. Modes of treating pre-sowing grain seeds with ozone / I.V. Baskakov, V.I. Orobinsky, A.M. Gievsky, A.V. Chernyshov, V.A. Gulevsky // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on World Technological Trends in Agribusiness (Russia, Omsk, 29-30 March, 2021). IOP Publishing Ltd, 2022. Vol. 954. №012009. 5 p. (DOI: 10.1088/1755-1315/954/1/012009)

3. The influence of the ozonation process on the efficiency of drying corn grain / I.V. Baskakov, V.I. Orobinsky, A.M. Gievsky, A.V. Chernyshov, T.N. Tertychnaya // Vestnik of the Voronezh State Agrarian University. 2018. T.11, No. 4 (59). pp. 127-133. (DOI: 10.17238/issn2071-2243.2018.4.127)

4. Studies of the ozonation process when drying grain / I.V. Baskakov, V.I. Orobinsky, V.A. Gulevsky, A.M. Gievsky, A.V. Chernyshov // IOP Conference Series. 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming (Russia, Voronezh, October 17-18, 2019). IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 422. № 012009. 9 p. (DOI: 10.1088/1755-1315/422/1/012009)

5. Grain disinfection with ozone-air mixture / I.V. Baskakov, V.I. Orobinsky, A.M. Gievsky, V.A. Gulevsky, A.V. Chernyshov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Environmental Problems of Food Security: International Scientific and Practical Conference (Russia, Voronezh, 21-22 February, 2022). IOP Publishing Ltd, 2022. Vol. 1043. №012037. 5p. (DOI: 10.1088/1755-1315/1043/1/012037)

6. Influence of ozonation in seed storage on corn grain yield and its quality / I.V. Baskakov, V.I. Orobinsky, V.A. Gulevsky, A.M. Gievsky, A.V. Chernyshov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness (TSIA-2019) (Russia, Stavropol, October 21-22, 2019). IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 488. №. 012007. 6 p. (DOI: 10.1088/1755-1315/488/1/012007)

7. Tatarchenko G.O., Cherkass K.V., Kuzyukov A.N. Corrosion-electrochemical behavior of nickel in ozonized solutions of sulfuric acid // Physico-chemical mechanics of materials. 2002. T.38, Issue. 1. pp. 98-100.

8. Tatarchenko G.O., Cherkass K.V., Pavlova M.V. On the passivation of chromium in ozonized sulfuric acid solutions // Physico-chemical mechanics of materials. 2001. Issue. 2. pp. 97-102.

9. Makarova Zh.G. The influence of ozonation processes on the corrosion-electrochemical behavior of titanium in acidic environments // News of the Ukrainian State University. 1999. No. 4(20). pp. 96-98.

10. Samoilova Zh.G. The influence of ozone on the corrosion-electrochemical behavior of titanium and its alloys with aluminum in acidic environments: dis... cand. tech. Sciences: 05.17.14. Severodonetsk, 2004. 146 p.

11. Cherkas K.V., Tatarchenko G.O. The influence of ozone on the cathodic and anodic behavior of iron and cobalt in sulfuric acid solutions. – Text: electronic // PANDIA: Internet portal. – URL: <https://pandia.ru/text/80/565/424.php?ysclid=l8sz0jqu8i548476200> (Date of access: 09/30/2023).

12. Cherkas K.V. Behavior of molybdenum in ozonized solutions of sulfuric acid // Physico-chemical mechanics of materials. 2002. Issue. No. 3. P.148-153.

13. Zhukov I.A., Baskakov I.V., Orobinsky V.I. Study of the influence of the ozonation process on the corrosion of metals // Current directions of scientific research for the effective development of the agro-industrial complex: materials of the international. scientific-practical conf. (Russia, Voronezh, March 17, 2023). Voronezh: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Voronezh State Agrarian University, 2023. pp. 28-37.

14. The influence of ozone on the corrosion behavior of steels 12X18H10T, 08X22H10T, 06XH28MДТ in the processes of synthesis of azole dicarboxylic acids / N.F. Tyupalo, G.O. Tatarchenko, B.A. Gru, V.S. Kuzub // Journal of Applied Chemistry. 1991. No. 5. P.1085-1087.

15. Tatarchenko G.O. The influence of ozone on the corrosion-electrochemical behavior of steels in organic synthesis processes: dis... cand. tech. Sciences: 05.17.14. M., 1993. 157 p.

16. Татарченко Г.О. Коррозионное поведение сварных соединений в озонируемых кислых средах // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т.1. № 5. С. 45-48.

17. Tatarchenko G.O., Kuzyukov A.N. The influence of ozone on the electrochemical and corrosion behavior of metals in acidic environments // Protection of metals. 2004. T40, No. 1. pp. 106-108.

18. Tatarchenko G.O., Shapovalova I.N., Tyupalo N.F. Selection of corrosion-resistant structural materials in ozonized solutions of acetic acid // Physico-chemical mechanics of materials. 2002. Issue. 3. pp. 143-147.

19. Tatarchenko G.O., Shapovalova I.N. The influence of ozone on the corrosion of steels in the oxidation of pyridines // Protection of Metals. 2005. No. 5. pp. 515-519.

Информация об авторах

И. В. Баскаков – доктор сельскохозяйственных наук, доцент; В.И. Оробинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; А.В. Химченко – кандидат технических наук, доцент; А.В. Чернышов – кандидат технических наук, доцент, О.В. Чернова – соискатель.

Information about the authors

I. Baskakov – Full Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor; V. Orobinsky – Full Doctor of Agricultural Sciences, Professor; A. Himchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; A. Chernyshov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, O.V. Chernova – the applicant.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 09.03.2024 Принята к публикации (Accepted): 14.04.2024

Тип статьи: научная
УДК 621.822.6.004.67: 668.3: 631.3.02
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-150-159

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУРБИННОЙ МЕШАЛКИ ДЛЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Ли Роман Иннакентьевич¹, Киба Мария Романовна², Тоиров Ильхом Жураевич³,
Ерохин Виктор Евгеньевич⁴, Лисовый Игорь Васильевич⁵

^{1, 4, 5} Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация,

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация,

³ Каршинский инженерно-экономический институт, Карши, Республика Узбекистан

¹ romanlee@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4880-6081>

² <https://orcid.org/0000-0001-9999-8146>

³ <https://orcid.org/0009-0004-8377-3283>

⁴ <https://orcid.org/0000-0003-3997-2563>

⁵ <https://orcid.org/0009-0003-8980-1778>

Автор, ответственный за переписку: Ли Роман Иннакентьевич, romanlee@list.ru
Corresponding author: Li Roman, romanlee@list.ru

Реферат. Мешалки с техническими характеристиками, установленными ГОСТ 20680-2002, не пригодны для перемешивания растворов полимерных нанокомпозиов при восстановлении посадок подшипников. В ЛГТУ определены оптимальные конструктивные параметры многолопастной турбинной мешалки с наклонными лопатками полной длины для перемешивания растворов полимерных нанокомпозиов. По этим параметрам получены формулы для расчета насосного эффекта и мощности при проектировании многолопастных турбинных мешалок различных типоразмеров. Экспериментально определено среднее значение коэффициента окружных скоростей, которое составляет $k \approx 0,92$. Предложена формула для расчета мощности при проектировании многолопастных турбинных мешалок различных типоразмеров с наклонными лопатками полной длины. Эксперимент показал высокую сходимость расчетных и фактических значений мощности, потребляемой турбинной мешалкой при перемешивании растворов нанокомпозиов. Проведен эксперимент для оценки и выбора критерия подобия для проектирования многолопастных турбинных мешалок различных типоразмеров. Исследовали критерии подобия Рейнольдса и Фруда. Коэффициент светопропускания раствора после перемешивания при частоте вращения, определенной по критерию Рейнольдса составляет $K_c = 57\%$. Аналогичный параметр раствора после обработки на режиме, определенном по критерию Фруда, в 2,2 раза ниже и составляет $K_c = 26\%$. Более высокий показатель качества по критерию Фруда подтверждается тем, что прочность образцов составляет $\sigma = 27,308$ МПа, что в 1,24 раза больше прочности образцов, полученных из растворов нанокомпозиов, обработанных на режиме, определенном по критерию Рейнольдса. В результате проведенных исследований предложена формула для расчета мощности многолопастных турбинных мешалок с наклонными лопатками. Моделирование конструктивных и режимных параметров многолопастных турбинных мешалок различных типоразмеров следует проводить по критерию Фруда.

Ключевые слова: полимерный композит, раствор, смешение, турбинная мешалка, конструктивные параметры, моделирование.

MODELING AND CALCULATION OF DESIGN AND OPERATING PARAMETERS

TURBINE MIXER FOR SOLUTION DISPERSION POLYMER COMPOSITES

Roman Li¹, Maria Kiba², Ilkhom Toirov³,
Victor Erohin⁴, Igor Lisovy⁵

^{1, 4, 5} Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia,

² St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia,

³ Karshi Engineering and Economic Institute, Karshi, Uzbekistan

¹ romanlee@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4880-6081>

² <https://orcid.org/0000-0001-9999-8146>

³ <https://orcid.org/0009-0004-8377-3283>

⁴ <https://orcid.org/0000-0003-3997-2563>

⁵ <https://orcid.org/0009-0003-8980-1778>

Abstract. Mixers with technical characteristics established by GOST 20680-2002 are not suitable for mixing solutions of polymer nanocomposites when restoring bearing fits. The optimal design parameters of a multi-bladed turbine mixer with full-length inclined blades for mixing solutions of polymer nanocomposites were determined at the Lipetsk State Technical University. Formulas for calculating the pumping effect and power when designing multi-blade turbine mixers of various sizes are obtained using these parameters. The average value of the peripheral speed coefficient, which is $k \approx 0.92$, was determined experimentally. A formula for calculating power when designing multi-blade turbine mixers of various standard sizes with full-length inclined blades is proposed. The experiment showed a high convergence of calculated and actual values of power consumed by a turbine mixer when mixing nanocomposite solutions. An experiment was carried out to evaluate and select a similarity criterion for the design of multi-bladed turbine mixers of various standard sizes. Reynolds and Froude similarity criteria were studied. The light transmission coefficient of the solution after stirring at a rotation frequency determined by the Reynolds criterion is $Kc = 57\%$. A similar parameter of the solution after treatment in the mode determined by the Froude criterion is 2.2 times lower and amounts to $Kc = 26\%$. A higher quality index according to the Froude criterion is confirmed by the fact that the strength of the samples is $\sigma = 27.308$ MPa, which is 1.24 times greater than the strength of samples obtained from nanocomposite solutions processed in the mode determined by the Reynolds criterion. A formula for calculating the power of multi-bladed turbine mixers with inclined blades was proposed as a result of the research. Modeling of the design and operating parameters of multi-blade turbine mixers of various standard sizes should be carried out according to the Froude criterion.

Keywords: polymer composite, solution, mixing, turbine mixer, design parameters, modeling.

Для цитирования: Ли Р.И., Коба М.Р., Тоиров И.Ж., Ерохин В.Е., Лисовый И.В. Моделирование и расчет конструктивных и режимных параметров турбинной мешалки для диспергирования растворов полимерных композитов // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 150-159. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-150-159>.

For citation: Li R., Kiba M., Toirov I., Erohin V., Lisovy I. Modeling and calculation of design and operating parameters turbine mixer for solution dispersion polymer composites. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 68(2): 150-159. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-150-159>.

Введение. Восстановление изношенных деталей современными технологиями обеспечивает значительное снижение расходов на ремонт, сокращение простоев техники, многократно увеличивает ресурс восстановленных деталей [1-6]. Технологии восстановления посадок подшипников на валах и в корпусных деталях полимерными композитами отличает простота, низкое потребление ремонтных материалов и электроэнергии. При этом ресурс восстановленных подшипниковых узлов многократно превышает расчетный, благодаря исключению фреттинг-коррозии и снижению контактных напряжений в подшипнике.

Актуальными являются исследование и разработка полимерных нанокомпозитов.

Наполнение полимеров наночастицами позволяет получать материалы с уникальными потребительскими свойствами [7-14]. При ремонте техники композиты получают введением наночастиц наполнителя в раствор полимера и перемешиванием компонентов вручную или с использованием ультразвуковых ванн. Исследования в работе Киба показали снижение критерия эрозионной активности в растворах эластомерных нанокомпозитов, в сравнении с растворами эластомерных микрокомпозитов. Поэтому для повышения эффективности ультразвукового диспергирования растворов эластомерных нанокомпозитов необходимо использовать ультразвуковые излучатели повышенной мощности. Этот вопрос требует всестороннего изучения, проведения теоретических и экспериментальных исследований.

Обращает на себя внимание использование для приготовления растворов полимерных нанокомпозитов аппаратов с мешалками. Последние отличаются относительной простотой конструкции, высокой надежностью, низким энергопотреблением, однако они не пригодны для использования при перемешивании растворов полимерных нанокомпозитов, предназначенных для восстановления посадок подшипников. ГОСТ 20680-2002 определяет технические условия к аппаратам с турбинной мешалкой. Однако у этих аппаратов емкость сосуда составляет от 0,01 до 100 м³. Расход композита на восстановление корпусной детали не превышает 50 мл, поэтому вышеуказанные мешалки не пригодны для перемешивания растворов полимерных нанокомпозитов при восстановлении.

Расход раствора полимерного нанокомпозита и, соответственно объем, подлежащий перемешиванию в ходе приготовления материала, зависит от номенклатуры и годовой программы восстанавливаемых деталей. Поэтому возникает необходимость в аппаратах с мешалками с различной емкостью сосуда, обеспечивающими одинаковый технологический эффект и минимальные при этом значения потребляемой мощности и расхода электроэнергии.

Насосный эффект и мощность, потребляемая на перемешивание раствора, являются важными техническими характеристиками мешалки и поэтому расчет этих характеристик для разрабатываемых в ЛГТУ многолопастных турбинных мешалок представляет научный и практический интерес.

Гидродинамический процесс, протекающий в аппарате с мешалкой, отличается сложностью, трудно поддается аналитическому описанию и поэтому при исследовании широко используют моделирование и критерии подобия [15, 16].

Цель исследований – получить формулы расчета насосного эффекта и мощности многолопастных турбинных мешалок, обосновать, на основе моделирования, выбор критерия подобия, обеспечивающего наиболее адекватную модель мешалки.

Материалы и методы. В ходе исследований использовали оригинальные многолопастные турбинные мешалки различных типоразмеров, конструктивные параметры которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Конструктивные параметры турбинных мешалок

Параметр	Обозначение	Размерность	Мешалка №1	Мешалка №2	Мешалка №3
Диаметр мешалки	d	мм	34	68	90
Внутренний диаметр аппарата с мешалкой	D	мм	37	74	98
Ширина лопатки мешалки	b	мм	7	14	18,5
Угол наклона лопатки	α	градус	43	43	43
Высота столба жидкости в аппарате с мешалкой	H	мм	30	60	79
Высота установки мешалки от дна сосуда аппарата	h	мм	11,5	22,1	30

В ЛГТУ определены оптимальные режимы 3D печати мешалки с наклонными лопатками из пластика PETG на принтере марки Flying Bear Ghost 5 [17]. На рисунке 1 показаны мешалки различных типоразмеров, изготовленные методом 3D печати.



Рисунок 1 – Турбинные мешалки с наклонными лопатками различных типоразмеров

В качестве привода использовали миксер мощностью 900 Вт. Частоту вращения мешалки регулировали лабораторным автотрансформатором SUNTEK 500BA 0-300 В SK2.1 LTR0500, используя тарировочный график, предварительно составленный с помощью лазерного тахометра UNI-T UT373.

Для использования лазерного тахометра на валу мешалки необходимо сделать выступ, который будет считывать лазерная система, и определять частоту вращения. Для решения этой задачи выполнена и напечатана 3D модель турбинной мешалки с одной лопастью. 3D модели и готовые детали показаны на рисунке 2.

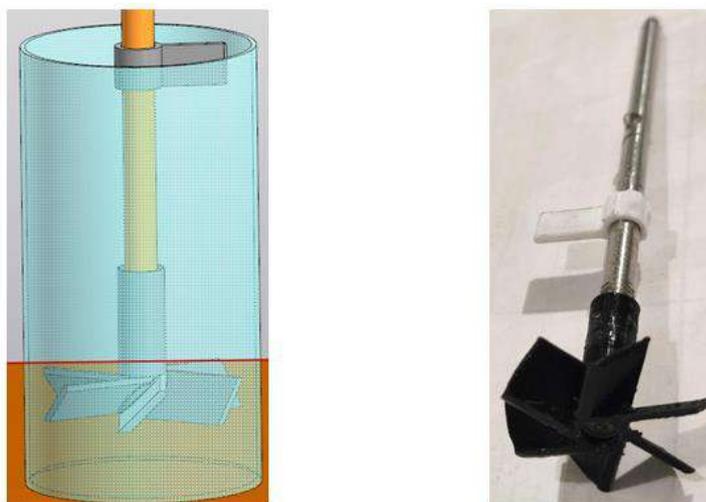


Рисунок 2 – 3D модель и готовые детали для тахометра

Для смешения и диспергирования использовали раствор нанокompозита на основе эластомера Ф-40С. Состав нанокompозита, разработанный в ЛГТУ: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч. (ТУ 6-06-246-92), алюминиевый нанопорошок – 0,075 масс.ч. (ТУ 1791-003-36280340-2008) [18, 19].

Отбор компонентов осуществляли на весах аналитических марки ВЛА-200М с ценой деления 0.0001 г.

Диспергирование раствора нанокompозита проводили при температуре 20°C в течение 5,5 мин.

Мощность, потребляемую мешалкой при диспергировании, измеряли ваттметром марки SINOTIMER DDS108-EU.

Адекватность модели проверяли по критерию Фишера [20]

Расчетное значение F_p - критерия вычисляли по формуле

$$F_p = \frac{m \cdot S^2}{S_e^2},$$

где m – повторность в опыте, $m = 3$.

Дисперсию воспроизводимости результатов эксперимента определяли по формуле

$$S_e^2 = \sum_{g=1}^N \frac{S_g^2}{N}$$

Выборочную дисперсию S^2 , интегрально оценивающую степень рассеивания \hat{Y}_g относительно \bar{Y}_g , вычисляли по формуле

$$S^2 = \frac{\sum_{g=1}^N (\hat{Y}_g - \bar{Y}_g)^2}{N - d^*},$$

где \hat{Y}_g – расчетное значение отклика; \bar{Y}_g – среднее значение отклика, полученное из опытов; N – количество опытов в эксперименте, $N = 3$; d^* – количество значимых коэффициентов регрессии.

Табличное значение критерия Фишера F_T для принятого уровня значимости $P=0,05$ и чисел степеней свободы числителя $v_1=N-d^*$ и знаменателя $v_2=N(m-1)$ определяли из таблицы [20].

Модель считается адекватной, если выполняется условие $F_p < F_T$.

Качество диспергирования оценивали коэффициентом светопропускания и прочностью образцов. Способ оценки качества смешения растворов полимерных композитов включает: калибрование прибора на интенсивность светового потока, проходящего сквозь раствор не наполненного полимера I_0 ; отбор в кювету раствора полимерного композита, предварительно подвергнутого интенсивному смешению, и измерение прибором интенсивности светового потока, проходящего сквозь раствор композита I , с последующим автоматическим расчетом коэффициента светопропускания раствора полимерного композита (рассчитывается по формуле

$$K_c = \frac{I}{I_0} \times 100, \%)$$

В ЛГТУ разработан прибор для экспресс-оценки качества смешения и диспергирования, который изготовлен методом 3D печати. На способ и прибор для экспресс-оценки качества смешения и диспергирования в ФИПС подана заявка №2023111783/28(025080) «Способ оценки качества смешения растворов полимерных композитов и устройство для его осуществления», которая в настоящее время проходит экспертизу по существу.

Образцами являлись прямоугольные пленки полимерного нанокompозита размером $50 \times 10 \times 0,15$ мм. Рабочая длина пленок составляла 30 мм. Термическую обработку образцов проводили в сушильном шкафу СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3 ступенчато: первая ступень: $T = 50^\circ\text{C}$ в течение 1 ч; вторая ступень: $T = 150^\circ\text{C}$ в течение 2 ч. После термической обработки образцы кондиционировали в течение 24 ч при температуре 20°C [21].

Испытания образцов проводили на разрывной машине ИР 5082-50. Скорость нагружения при испытаниях составляла 5 мм/мин и была постоянной.

Прочность пленок σ рассчитывали по формуле

$$\sigma = \frac{F_p}{A},$$

где F_p – разрушающая нагрузка, Н; A – площадь поперечного сечения пленки, мм².

Результаты и обсуждение. Расчет насосного эффекта турбинной мешалки на основе упрощенной теории вихревых насосов.

Многолопастная турбинная мешалка с наклонными лопатками создает смешанный радиально-осевой поток [15]. Общий насосный эффект V_p^* при этом можно рассчитать по формуле

$$V_p^* = \pi^2 b n d^2 (1-k) \left(\cos^2 \alpha + \frac{d}{6b} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \right) \quad (1)$$

где k – коэффициент окружных скоростей (отношение угловой скорости жидкости к угловой скорости мешалки), определяющий тип потока: при $k = 1$ поток является чисто тангенциальным (окружным), при $k = 0$ – чисто радиальным.

Ранее были определены оптимальные конструктивные параметры многолопастной турбинной мешалки с наклонными лопатками полной длины для перемешивания растворов полимерных нанокомпозитов [22]. После ввода в формулу (1) параметров: $\alpha = 43^\circ$ и $b = d/6$, получили формулу для расчета насосного эффекта разрабатываемой в нашей работе многолопастной турбинной мешалки

$$V_p^* = 1,876 d^3 \cdot n \cdot \pi^2 (1-k) \quad (2)$$

Мощность, расходуемую на перемешивание, можно определить по зависимости

$$N = \gamma \cdot V_p^* \cdot k (\pi \cdot d \cdot n)^2, \quad (3)$$

где γ – плотность раствора полимерного нанокомпозита.

Полагая, что мощность N известна, получили систему из двух уравнений (2) и (3) с двумя неизвестными V_p^* и k .

В таблице 2 показаны результаты расчета с использованием экспериментально измеренной мощности турбинной мешалки, расходуемой на перемешивание раствора нанокомпозита на основе эластомера Ф-40С, при различных значениях частоты вращения.

Таблица 2 – Результаты расчета насосного эффекта многолопастной турбинной мешалки с наклонными лопатками

№ п/п	Частота вращения мешалки n , с ⁻¹	Плотность раствора полимерного нанокомпозита γ	Диаметр мешалки d , м	Мощность N , Вт	Насосный эффект, $V_p^* \times 10^{-4}$ м ³ /с	Коэффициент окружных скоростей, k
1	13	820	0,068	1,8	3,952	0,925
2	15,32	820	0,068	3,0	4,751	0,923
3	17,68	820	0,068	4,4	5,21	0,927

Как следует из таблицы 2 среднее значение коэффициента окружных скоростей составляет $k \approx 0,92$.

После подстановки формулы (2) в (3) получили формулу для расчета мощности многолопастной турбинной мешалки с наклонными лопатками

$$N = 182,4 \gamma \cdot n^3 \cdot d^5 \cdot k (1-k) \quad (4)$$

Далее оценили адекватность формулы (4) по критерию Фишера при проектировании турбинных мешалок различных типоразмеров. Для этого провели эксперимент в ходе которого

измеряли мощность, потребляемую мешалкой большего типоразмера. Конструктивные и режимные параметры мешалки и результаты эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Мощность мешалки №3 при различных режимах работы

Параметр	Размерность	Частота вращения, с ⁻¹		
		10,590	12,522	14,421
Диаметр мешалки, d	м	0,09		
Коэффициент окружных скоростей, k		0,92		
Мощность расчётная, N	Вт	7,9	13,0	19,8
Мощность измеренная, $N_{изм}$	Вт	8,6	13,6	20,4

Выборочная дисперсия S^2 , интегрально оценивающая степень рассеивания \bar{Y}_g относительно \bar{Y}_g , составляет

$$S^2 = \frac{(7,9 - 8,6)^2 + (13,0 - 13,6)^2 + (19,8 - 20,4)^2}{2} = 0,605$$

Расчетное значение F_p - критерия составляет

$$F_p = \frac{3 \cdot 0,605}{0,5934} = 3,06$$

Табличное значение критерия Фишера составляет $F_m = 5,14$ [20]. Зависимость (3) является адекватной, так выполняется условие $F_p < F_T$.

Оценка и выбор критерия подобия для проектирования многолопастных турбинных мешалок различных типоразмеров. На завершающем этапе провели эксперимент для оценки и выбора критерия подобия для проектирования многолопастных турбинных мешалок различных типоразмеров.

Исследовали критерии подобия Рейнольдса и Фруда, поскольку для определения критерия Эйлера требуется измерение мощности, которое будет вносить определенную погрешность в конечный результат.

В работе [22] определена оптимальная частота вращения турбинной мешалки (мешалка №1) при диспергировании раствора эластомерного нанокompозита, которая составляет $n = 1325 \text{ мин}^{-1}$.

Параметры вышеуказанной мешалки и раствора нанокompозита представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры мешалки и раствора нанокompозита

Параметр	Обозначение	Размерность	Мешалка №1
Число оборотов мешалки	n	с ⁻¹	22,08
Диаметр мешалки	d	м	0,034
Плотность жидкости	γ	кг/м ³	820
Коэффициент динамической вязкости жидкости	η	Па·с	0,1346
Ускорение свободного падения	g	м/с ²	9,8

Для определения оптимальной частоты вращения мешалки №2 увеличенного типоразмера по критериям подобия Рейнольдса и Фруда, преобразовали формулы критериев подобия (1) и (2) к виду

$$n_{Re} = \frac{Re \cdot \eta}{d^2 \gamma}; n_{Fr} = \sqrt{\frac{Fr \cdot g}{d}}$$

где n – число оборотов мешалки, с⁻¹; d – диаметр мешалки, м; γ – плотность жидкости, кг/м³; η – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с, g – ускорение свободного падения, м/с².

Результаты расчета представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Значения частот вращения по Рейнольдсу и Фруду

Критерий	Критерий Рейнольдса R_e	Критерий Фруда F_r
Частота вращения, c^{-1}	5,5	15,615
Частота вращения, $мин^{-1}$	330	937

На режимах, указанных в таблице 5 провели диспергирование раствора нанокompозита на основе эластомера Ф-40С. По завершении обработки измерили коэффициент светопропускания растворов, изготовили образцы и провели испытание их на прочность. Результаты эксперимента представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Оценочные показатели качества диспергирования

Критерий	Частота вращения, $мин^{-1}$	Коэффициент светопропускания K_c , %	Прочность σ , Мпа
Рейнольдса R_e	330	57	21,971
Фруда F_r	937	26	27,308

Как видно из таблицы 6 диспергирование на частоте вращения $n = 937 \text{ мин}^{-1}$, определенной по критерию Фруда, обеспечивает значительно лучшее диспергирование, чем по критерию Рейнольдса, что подтверждается более высокими показателями качества (меньший коэффициент светопропускания и более высокая прочность).

Выводы:

1. В результате проведенных исследований предложена формула для расчета мощности многолопастных турбинных мешалок с наклонными лопатками.
2. Моделирование конструктивных и режимных параметров многолопастных турбинных мешалок различных типоразмеров следует проводить по критерию Фруда.

Список источников

1. Кононенко А. С. Повышение надежности неподвижных фланцевых соединений сельскохозяйственной техники использованием наноструктурированных герметиков: Дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2012. 405 с.
2. Жачкин С. Ю., Краснова М. Н., Пеньков Н. А., Краснов А. И. Моделирование механического воздействия инструмента при получении гальванических композитных покрытий // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 120. С. 130–134.
3. Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Мандрыкин И.А., Беленцов В.Г. Интенсификация восстановления деталей сельхозмашин дисперсно-упрочненным композитным покрытием на основе хрома // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. №3 (32) . С. 49-54.
4. Кононенко А.С., Дмитраков К.Г. Повышение стойкости полимерных композитов холодного отверждения к воздействию рабочих жидкостей использованием наноматериалов // Международный технико-экономический журнал. 2015. № 1. С. 89–94.
5. Черноиванов, В. И. Голубев, И. Г. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы). – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.
6. Карагодин, В. И., Митрохин Н. Н. Ремонт автомобилей и двигателей. М.: Мастерство, 2001. – 496 с.
7. R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba. Promising Nanocomposite Based on Elastomer F-40 for Repairing Base Members of Machines. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 128-132.
8. Полимерные нанокompозиты : многообразие структурных форм и приложений / А.К. Микитаев, Г.В. Козлов, Г.Е. Заиков; Ин-т биохим. физики им. Н.М. Эмануэля РАН. – М. : Наука, 2009. – 278 с.
9. Ли, Р.И. Математическая модель инфракрасного нагрева корпусных деталей при восстановлении полимерным материалом / Р.И. Ли, Д.Н. Псарев, А.Н. Быконя // Клеи. Герметики,

Технологии. 2019. № 9. С. 38-43.

10. R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin. A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly and Repair of Equipment. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 261-265.

11. Модель формирования равномерного полимерного покрытия на наружной поверхности вращающейся цилиндрической детали. Ли Р.И., Псарев Д.Н. Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 2. С. 34-38.

12. Михайлюк, А. Е. Разработка эластомерных материалов на основе этиленпропиленовых каучуков, модифицированных высокодисперсными частицами металлов: дис. ... канд. техн. наук / Михайлюк А.Е. – Волгоград, 2014. – 140 с.

13. Помогайло, А. Д. Наночастицы металлов в полимерах / А. Д. Помогайло, А. С. Розенберг, И. Е. Уфлянд. – Москва : Химия, 2000. – 672 с.

14. Кособудский, И. Д. Наноразмерные металлические частицы в полимерных матрицах: I. Синтез, механизмы образования и стабилизации / И. Д. Кособудский // Известия высших учебных заведений. – 2000. – Т. 43 (4). – С. 3-18.

15. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. Польша. 1971. Пер. с польск. под ред. Шупляка. И.А. Л., Химия, 1975. 384 с.

16. Проектирование процессов и аппаратов пищевых производств. Под ред. В.Н. Стабникова. Киев: Вища школа, 1982. - 199 с.

17. Ли, Р.И. Оптимизация режима 3-D печати турбинной мешалки для диспергирования растворов полимерных композитов / Ли Р.И., Киба М.Р., Гребеньков Д.В., Ерохин В.Е. – Текст : непосредственный // Наука в Центральной России. – 2024. – №1 (67). – С. 7-15.

18. <https://institut-plastmass.tiu.ru/p32507115-fenolnye-smoly-laki.html>

19. www.nanosized-powders.com

20. Ли, Р. И. Основы научных исследований: Учеб. пособие / Р. И. Ли. – Липецк: ЛГГУ, 2013. – 190 с.

21. Псарев, Д. Н. Технологические основы восстановления посадок подшипников качения в узлах сельскохозяйственной техники полимерными нанокompозитами : специальность 4.3.1 «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Псарев Дмитрий Николаевич ; ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ. – Мичуринск, 2024, – 478 с.

22. Ли, Р.И. Оптимизация конструктивных и режимных параметров турбинной мешалки для диспергирования растворов полимерных композитов / Р. И. Ли, М. Р. Киба, Д. В. Гребеньков, В. Е. Ерохин // Наука в Центральной России. – 2023. – №6(66). – С. 34-43.

References

1. Kononenko A. S. Increasing the reliability of fixed flange connections of agricultural machinery using nanostructured sealants: Diss. ... Dr. Tech. Sci. M., 2012. 405 p.

2. Zhachkin S. Yu., Krasnova M. N., Penkov N. A., Krasnov A. I. Modeling of the mechanical impact of a tool when producing galvanic composite coatings // Proceedings of GOSNITI. 2015. T. 120. pp. 130–134.

3. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Mandrykin I.A., Belentsov V.G. Intensification of restoration of agricultural machine parts with dispersion-strengthened composite coating based on chromium // Innovations in agriculture. 2019. No. 3 (32). pp. 49-54.

4. Kononenko A.S., Dmitrakov K.G. Increasing the resistance of cold-curing polymer composites to the effects of working fluids using nanomaterials // International Technical and Economic Journal. 2015. No. 1. pp. 89–94.

5. Chernoiivanov, V. I. Golubev, I. G. Restoration of machine parts (State and prospects). – M.: FGNU “Rosinformagrotekh”, 2010. – 376 p.

6. Karagodin, V.I., Mitrokhin N.N. Repair of cars and engines. M.: Masterstvo, 2001. – 496 p.

7. R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba. Promising Nanocomposite Based on Elastomer F-40 for Repairing Base Members of Machines. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 128-132.

8. Polymer nanocomposites: variety of structural forms and applications / A.K. Mikitaev, G.V. Kozlov, G.E. Zaikov; Institute of Biochemistry. physics named after N.M. Emanuel RAS. – M.: Nauka, 2009. – 278 p.

9. Lee, R.I. Mathematical model of infrared heating of body parts during restoration with polymer material / R.I. Lee, D.N. Psarev, A.N. Bykonya // Adhesives. Sealants, Technologies. 2019. No. 9. pp. 38-43.
10. R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin. A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly and Repair of Equipment. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 261-265.
11. Model of the formation of a uniform polymer coating on the outer surface of a rotating cylindrical part. Lee R.I., Psarev D.N. Adhesives. Sealants. Technologies. 2015. No. 2. P. 34-38.
12. Mikhailiuk, A. E. Development of elastomeric materials based on ethylene-propylene rubbers modified with highly dispersed metal particles: dis. ...cand. tech. Sciences / Mikhailiuk A.E. – Volgograd, 2014. – 140 p.
13. Pomogailo, A. D. Nanoparticles of metals in polymers / A. D. Pomogailo, A. S. Rozenberg, I. E. Uflyand. – Moscow: Chemistry, 2000. – 672 p.
14. Kosobudsky, I. D. Nanosized metal particles in polymer matrices: I. Synthesis, mechanisms of formation and stabilization / I. D. Kosobudsky // News of higher educational institutions. – 2000. – Т. 43 (4). – P. 3-18.
15. Strenk F. Stirring and apparatus with stirrers. Poland. 1971. Transl. from Polish edited by Shpiplika. I.A. L., Chemistry, 1975. 384 p.
16. Design of processes and apparatus for food production. Ed. V.N. Stabnikova. Kyiv: Vishcha School, 1982. - 199 p.
17. Lee, R.I. Optimization of the 3-D printing mode of a turbine mixer for dispersing solutions of polymer composites / Lee R.I., Kiba M.R., Grebenkov D.V., Erokhin V.E. – Text: direct // Science in Central Russia. – 2024. – No. 1 (67). – pp. 7-15.
18. <https://institut-plastmass.tiu.ru/p32507115-fenolnye-smoly-laki.html>
19. www.nanosize-powders.com
20. Lee, R.I. Fundamentals of scientific research: Textbook. allowance / R.I. Lee. – Lipetsk: Leningrad State University, 2013. – 190 p.
21. Psarev, D. N. Technological foundations for restoring seating of rolling bearings in agricultural machinery units with polymer nanocomposites: specialty 4.3.1 “Technologies, machines and equipment for the agricultural sector”: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Psarev Dmitry Nikolaevich; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Michurinsky State Agrarian University. – Michurinsk, 2024, – 478 p.
22. Lee, R.I. Optimization of design and operating parameters of a turbine mixer for dispersing solutions of polymer composites / R. I. Li, M. R. Kiba, D. V. Grebenkov, V. E. Erokhin // Science in Central Russia. – 2023. – No. 6 (66). – P. 34-43.

Информация об авторах

Р. И. Ли – доктор технических наук, профессор; М. Р. Киба – кандидат технических наук;
И. Ж. Тоиров – кандидат технических наук, доцент; В. Е. Ерохин – аспирант, И. В. Лисовый – студент.

Information about the authors

R. Li – Doctor of Technical Science, Professor; M. Kiba – Candidate of Technical Science;
I. Toirov – Candidate of Technical Science, Associate Professor; V. Erohin – Post Graduate Student;
I. Lisovy – Student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 13.03.2024 Принята к публикации (Accepted): 15.04.2024

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются.

За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы.

Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов.

При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Отпечатано в типографии «Студия печати Галины Золотовой».

Адрес типографии: 392032, Тамбовская область, г. Тамбов, ул. Кленовая, д. 24.

E-mail: studiapechati@bk.ru.

Дата выхода в свет 27.04.2024. Заказ № 20.

Формат 84x108/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Гарнитура Times. Объем – 16,8 усл. печ. л. Тираж 100 экз.